

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“
МИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
Кат. Подземно строителство**

маг. инж. Владимир Цолов Вутов

**ГЕОМЕХАНИЧНА ЛОГИСТИКА НА ПРОЕКТИРАНЕТО И СТРОИТЕЛСТВОТО
НА ТРАНСПОРТЕН ТУНЕЛ, ПРОКАРАН В СКАЛЕН МАСИВ, В УСЛОВИЯТА
НА РУДНИК ЕЛАЦИТЕ, ЕЛАЦИТЕ-МЕД АД**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
„доктор“

по професионално направление:

5.7. „Архитектура, строителство и геодезия“

Докторска програма: „Подземно строителство“

Научен ръководител: проф. д-р инж. Венцислав Иванов

Рецензенти: проф. д-р Любен Иванов Тотев

проф. д-р Димитър Георгиев Назърски

София, 2018 г.

Дисертационният труд е в обем 101 стр., обособен в 5 глави, съдържащи текст, 32 фигури, 12 таблици, 134 литературни източници и сайтове.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита на разширен катедрен съвет, съгласно заповед № Р-667 от 11.06.2018 г., състоял се на 15 юни 2018 г., с протокол № 6.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 13 септември 2018 г. от 11.00 часа в зала 235 „Видекс“ на М Т Ф, на открито заседание на научното жури.

Материалите по защитата (дисертация и рецензии) са на разположение на интересуващите се в сектор „Следдипломна квалификация“ на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – София.

Адрес: МГУ „Св. Иван Рилски“, София 1000
Студентски град, ул. „проф. Боян Каменов“ № 1
Ректорат, ет. 3, стая 79, тел 80 60 209.

Номерата на фигурите в автореферата съответстват на номерата на фигурите в дисертационния труд.

Автор: маг. инж. Владимир Цолов Вутов

Заглавие: Геомеханична логистика на проектирането и строителството на транспортен тунел, прокаран в скален масив, в условията на рудник Елаците, Елаците-Мед АД.

Тираж:

Печат:

I. УВОД

Тунелостроенето е практикувано още в праисторическите времена на човешкото обществено развитие. Най-старият, отговарящ на днешните ни представи, тунел е построен преди 4200 години в древен Вавилон, по волята на царица Семирамида. Тунелът е бил предназначен за пряка връзка между двореца и храмовия комплекс, намиращи се съответно на двата бряга на река Ефрат.

Тунели, отначало с военно и защитно предназначение, са строени през всички епохи на древния свят – Египет, Юдея, Древна Гърция и Рим. Тунелостроенето е затихвало по две причини – във времето на инквизицията и по време на Световните войни. Подем в тунелостроенето, предимно с гражданско предназначение (транспорт, рударство и др.), възниква с настъпването на Ренесанса.

За стара Европа, тунелното строителство с годините става повсеместен приоритет. Това е времето на проектите Готард и Симплон (Швейцария); Льоцберг, Караванко и Тауерн (Австрия); тунелите Ронко, Колди, Монте Адоне (Италия).

В хода на това интензивно строителство се натрупват масиви от данни, изискващи изучаване, систематизация, обяснение, прогнозиране и научно обосновани подходи за преодоляване на негативните явления и процеси съпътстващи строителството.

В началото, натрупаните масиви данни, теоретичните и експерименталните изследвания, се публикуват в различни професионални издателски направления - основно в тези с профил геомеханика, като на световния конгрес по геомеханика (Денвър, 1970, после на конгреса в Монтьо, 1974). По-късно те вече се обособяват в секции по научното направление ТУНЕЛИНГ.

Научната общност по света вече осъзнава три обстоятелства, които характеризират проблема тунелостроене на съвременния етап: 1 – „тунелингът“ е наднационален; 2 – той трябва да обединява най-известните специалисти от отделните държави; 3 – необходимостта от функционална организационна научна структура, свързваща общността, най-добрите практики и теоретични достижения. Естественият връх на развитие на описаните процеси е през 1974 г., когато по инициатива на 19 държави е основана

международната асоциация за тунелостроене ITA, много скоро реформирана до ITA AITES, включваща освен тунелостроенето, геотехническото овладяване на подземните пространства.

Дейността на ITA AITES се управлява от четири комитета:

1. ITA COSUF – Комитет за оперативна безопасност и сигурност при подземна геоинженерна дейност и специфично за тунели и подземни пространства;
2. ITA CET – комитет за обучение и повишаване на квалификация, популярен като „Университетска мрежа“;
3. ITA CUS – Комитет за подземни пространства, отговарящ за комплексната урбанизация на подземните пространства под градовете;
4. ITA TECH – Комитет за нови технологии.

За постигане на целите на ITA, във всеки от горните комитети е организирана мрежа от работни групи (WG). Всяка група е съставена от признати международни експерти, които изучават, анализират и обобщават световния опит в тунелостроенето и представят доклад по специализираните теми, пряко и косвено свързани с подземното строителство и тенденциите за развитие. Крайната цел на дейността на групите е чрез синтез на натрупаната информация, след сътрудничество с основните реномирани световни организации ISRM, WRA (Световна асоциация по пътно и ж.п. строителство), да се създадат правила и препоръки, които да се разпространят и използват като стандарти от националните организации, обединяващи всички специалисти от практиката или научно-информационното обслужване, навсякъде по света, за прогреса на обществото.

1.1. Състояние на проблема в света и у нас. Цели и задачи на изследването

Една от главните характеристики в развитието на света днес е урбанизацията на жизнената среда. Базов урбанистичен елемент е геотехническото строителство, в което тунелостроенето заема приоритетно място. Професор Марк Панет [4], на юбилейната сесия на Виенския технически университет, посветена на К. Терцати,

заявява, че главното геотехническо достижение на 20 век е строителството на тунели, а академик Трубецкой [5], че строителството на тунели е най-актуално, и че в най-развитите страни обема му се удвоява на всеки 10 години.

За характеристика и оценка на състоянието по проблема е извършен литературен обзор, който е реализиран в два етапа. В първият, приложеният обзор е тематичен. В тематичния обзор, дълбочина от 1970 г. насам, влизат направленията, класификация, изследване на основните групи фактори, определящи кръга от задачи при най-добрите практики.

В резултат на тематичното проучване са определени етапите за постигането на успешен геотехнически проект е необходимо да се извършат следните фази:

1. *Характеризация* за получаване на всичките основни, необходими входни разчетни параметри на масива и неговото окачествяване чрез системите за класификация.

2. *Диагностика* на напрегнатото състояние и прогнозиране на геомеханичното поведение и реакция на масива; изграждане на структурен и геомеханичен модел с последващи параметрични анализи на системата ВМ/Т, чрез числено поетапно и постадийно (ако се налага) моделиране, с проверка и верификация на емпиричните препоръки за прокарване и закрепване с временен и постоянен крепеж.

3. *Геомеханична логистика* и захранване решенията в инженерния проект, или осъществяване на необходими корекции в него.

4. *Валидизация* на проекта чрез геомониторинг.

Вторият етап на обзора за състоянието е направен въз основа на издадените и разпространявани, между държавите членки, документи на Световната Тунелна Асоциация (ITA AITES).

Общата характеристика на съвременната концепция (по документите на ITA AITES) за състоянието по проблема е показана като блокова схема на фиг. 1.

Естествено е, след дадения по-горе анализ на състоянието на тунелното строителство в света, то да се сравни с това у нас.

Тунелното строителство у нас се регулира чрез нормативни бази с йерархично структура – закон, наредби, правилници, норми и правила.

В най-общ план, сравнението между управлението, организацията и изпълнението на тунелното строителство, въпреки неговата сложност, етапност и видове дейности установява некохерентност между нашата практика и т.н. добри световни практики.

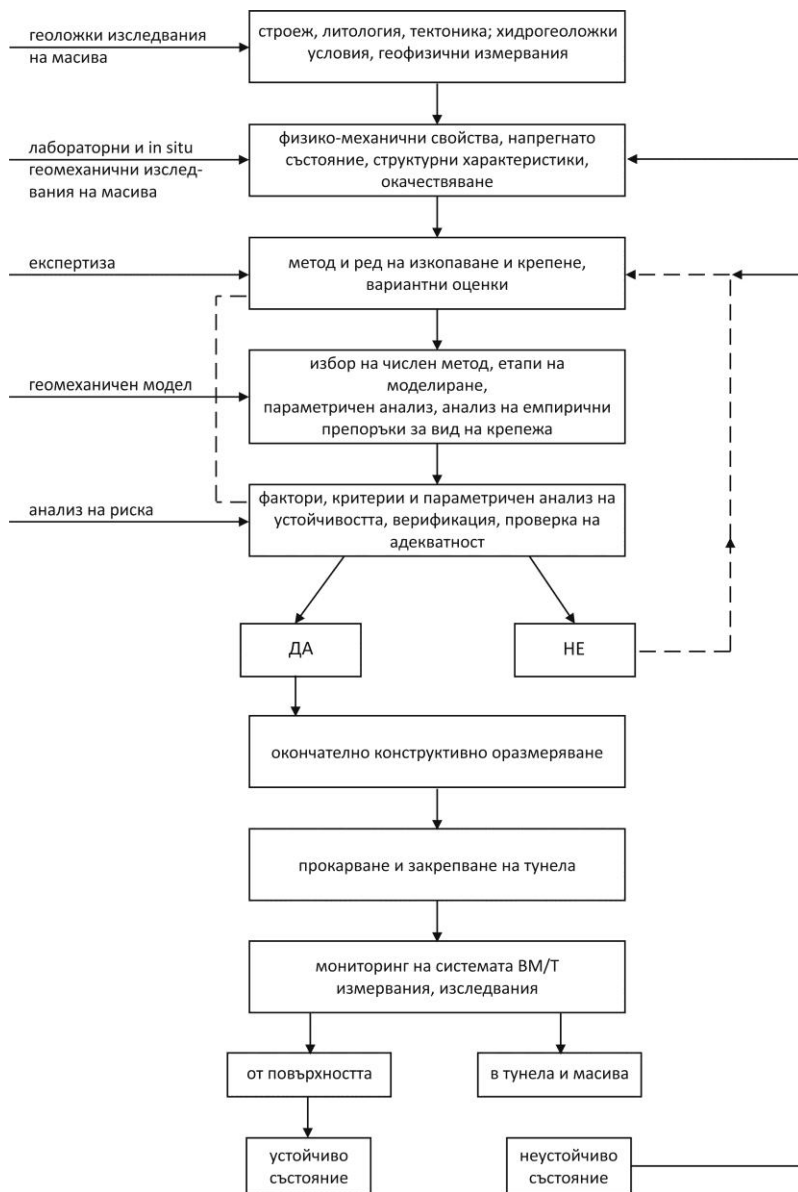
Характеризацията на съвременното състояние в областта на тунелното строителство у нас ще бъде непълна, ако не отбележим обстоятелството, че независимо от установените нормативни несъответствия, отделни авторски позиции, тунелостроенето и неговото научно информационно обслужване у нас с годините бележат определено развитие.

В много национални научни форуми и специализирана по този проблем периодика има публикации за теоретични изследвания, за конкретни проекти, съдържащи информация за успешно и уместно приложение на елементи и етапи от т.н. добри практики на развитите страни.

I.2. Изводи и заключение

1. Тунелостроенето е основно направление на съвременното подземно геотехническо строителство.

В международен план, научно-информационното осигуряване, организацията и управлението на всеки етап – от идейния проект, през инженерния проект, строителството, до експлоатацията на тунела, в модерния свят, днес са изключително развити.



Фиг. 1. Обща концепция за процеса на проектиране и строителство на тунели (блокова схема) по документи на ITA

2. Сравнението по описаните направления в национален аспект показва наличие на несъответствия и пропуски, което обуславя известно изоставане спрямо най-развитите държави. Причини, според нас, за това са следните обстоятелства:

- Теоретичният фундамент на тунелостроенето, по наше мнение, е ситуиран между две научни области – тези на строителните и минни науки. В цитираните държавни документи превес имат постулатите на строителната механика.

- При прокарването на тунелите в скална среда проблемите са различни. Вместващият масив е предварително напрегнат от полета на напрежения с различен генотип. Системата ВМ/Т по същество е природно-техногенна и нейното НДС зависи от параметрите на естественото напрегнато състояние, индуцираните от прокарването напрежения, свойствата и структурните характеристики на масива и технологичните въздействия на режима при изкопаване. В този случай, методите на приложната геомеханика са единствените, които осигуряват количествено определяне на НДС и устойчивостта на упоменатата система.

3. Тунелното строителство в страната има потенциал за развитие в унисон със световните тенденции. Съвременното му състояние обуславя необходимост от актуализация за съответствие по някои от специфичните направления. Едно такова направление е комплексно параметрично осигуряване и логистика на проектирането и строителството на транспортните тунели. На този проблем е посветена темата и изследванията на настоящата дисертация.

1.3. Цели и задачи на дисертационния труд

Въз основа на извършеното проучване и анализи на състоянието на проблема транспортно тунелостроене в развитите страни и у нас, в представения труд, е поставена целта за достигане на пълно геомеханично осигуряване на проекта и строителството на транспортен тунел в максимално съответствие с най-добрите световни практики.

За постигането на тази цел е необходимо решаването на следните задачи:

1. Да се структурира и състави адекватна методология за комплексна геомеханична логистика на проектирането и строителството на транспортен тунел за връзка между корпусите за едро трошене на рудата КЕТ2 и КЕТ3 на рудник „Елаците“.

2. Избраните аналитични, експериментални и експертни методи, съставляващи методологията да се приложат поетапно и във взаимна обвързаност за определяне на геомеханичното състояние на проблемната зона и системата ВМ/ТТ чрез решение на следните задачи:

2.1. Характеризация на скалния масив, вместващ тунела по механични и структурни свойства и напрегнато състояние и съставяне на многомерна база от данни за параметри на състоянието.

2.2. Числено моделиране и параметрично изследване на НДС, геомеханичния риск и устойчивостта на системата ВМ/ТТ в съответствие с етапите на изграждане на тунела и конкретните геотехнически условия.

2.3. Формулировка на геомеханични подходи за логистично осигуряване на проектните решения, етапите на строителство и методите за поддържане на тунела и системата в устойчиво състояние.

3. Всички избрани и приложени методи за аналитичните, лабораторните и *in situ* изследвания използвани за целите на разглеждания проблем да отговарят на стандартите на Световната тунелна Асоциация ITA AITES и изискванията на Международната Асоциация по механика на скалите ISRM.

II. МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ГЕОМЕХАНИЧНА ЛОГИСТИКА

Находище „Елаците“ е разположено между прохода Кашана (запад) и източно от връх Баба (1727,2 м) в Етрополската планина. Теренът му е с надморска височина 1520/985 м. Териториално, находището е в землището на гр. Етрополе, област София, между градовете Етрополе и Златица (фиг. 2).



Фиг.2.

Масивът в района на находището най-общо е изграден от три типа скали:

- палеозойски метаморфен комплекс, съставен от разновидности шисти, филити и хорнфелзи, разположен в южната част;
- интрузивен комплекс, състоящ се от различни типове гранодиорити (основно амфибол и амфибол-биотитови), изграждащи централната и северни части;
- дайкови скали, процепващи и двата комплекса, внедрени както в шистите, така и в гранодиоритите.

Скалният масив е нарушен от различно ориентирани снопове разломи. Определящо значение за структурните условия, респективно за рудната локализация на находището имат зоните на пресичането на руптурите от Пристанищенската (ССИ) и Елашката (ИЮИ) системи, както и субпаралелните им разломи от по-нисък ранг [101].

Скалите от находището са нарушени от две до шест системи пукнатини, които са оперяващи на разломните структури. Напукаността е различно проявена в отделните му части, като най-интензивни са пукнатините от ССИ-ИЮИ системи.

Находище „Елаците“ се приема за слабо оводнено. Подземните води са от два типа – безнапорни с плитка и напорни, с дълбока циркулация. Те са хидравлично свързани, имат идентичен състав и максимален дебит 2,2 – 3,0 l/sec (за напорните води). На територията на рудника са установени 84 водопроявления, дислоцирани само в южната част на находището, т.е. извън проектната зона.

Находището е с медно-порфирно орудяване. Освен мед и молибден от практически интерес са съдържащите се в рудата злато, сребро, селен, телур, германий и галий.

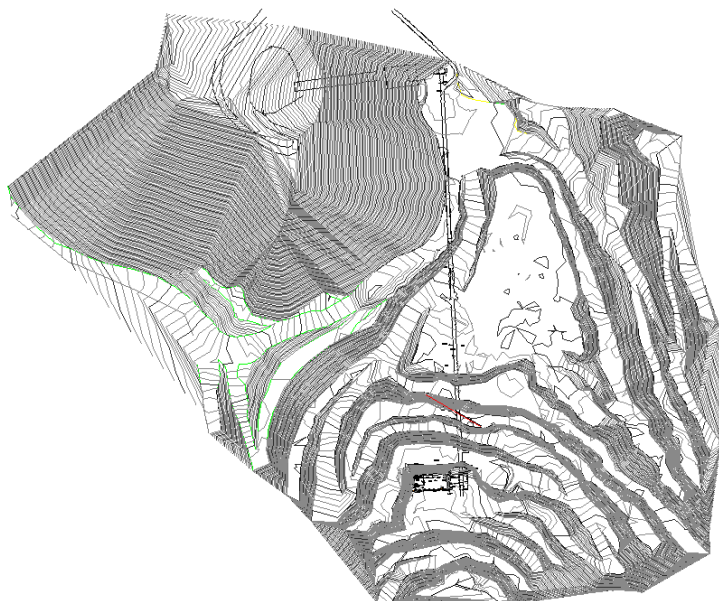
Рудното тяло е щокверк от рудни стълбове с почти вертикални граници, и е с дълбочина над 500 м, а в план, то е с дължина и ширина 800 и 350 ÷ 500 м, съответно. Разработването на находището е чрез открит добив на рудата. Капацитета на рудник „Елаците“, надхвърля 1,2 млн. тона.

В резултат на интензивната, дългогодишна експлоатация, кариерата достига дълбочина, обуславяща нарастването на транспортните разстояния от рудника до корпуса за едро трошене (KET) на рудата, респективно съществено увеличаване на транспортните разходи на рудника. В програмата му за развитие е планирано прокараването на наклонен тунел, снабден с гумено-транспортна лента за извозване на рудата от чашата на рудника (кота 1030) до KET, на кота 1120.

Реализацията на този проект, дава възможност за съществена оптимизация на транспортната схема на рудника, осигурява значително пряко и косвено подобряване на икономическите

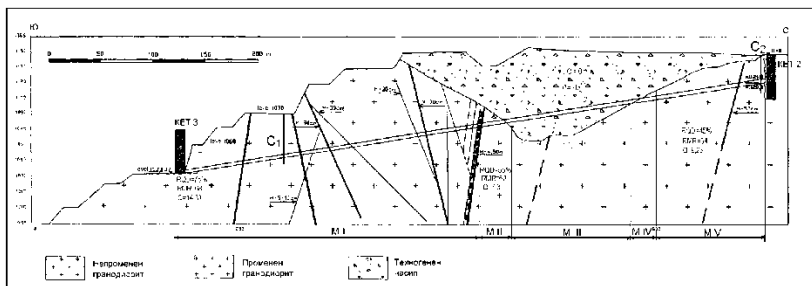
показатели на дружеството, както и за ефективно подобряване на качеството на околната среда, в района.

Съгласно идейния проект, транспортният тунел е разположен в СИ част на рудника, извън контурите на рудното тяло. Тунелът е с планирана дължина от 560 м и светло сечение $10,6 \text{ м}^2$, с подковообразна форма. Тунелът е праволинеен, с ориентирана на север (357°) ос и е с наклон 9° по направление Ю-С. Тунелът е плитко заложен, но трасето му преминава през различни геоложки среди от естествен скален масив, като в средната част (около 130 м), тунелът пресича техногенен насип от уплътнени скални късове. На фиг. 3 е показан ситуационен план с разположението на тунела.



Фиг. 3. Местоположение на транспортния тунел

На фиг. 4 е показан геоложки разрез на проектната зона.



- Фиг. 4. Геоложки разрез на масива в проектната зона
- I участък от 0 м до 280 м – масивен гранодиорит;
 - II участък от 280 до 300 м – преходна зона – изветрял гранодиорит;
 - III участък от 300 до 440 м – изкуствен насип от скални късове от гранодиорит и хорнфелзи;
 - IV участък от 440 до 470 м – преходна зона – изветрял гранодиорит;
 - V участък от 470 до 560 м – напукан гранодиорит;

II.1. Геоложка характеристика на проектната зона

Скалният масив, в обхвата на тунела, е изграден от един литоложки тип скали – разновидности амфибол и амфибол-биотитови гранодиорити. По трасето на тунела, от южния портал до 280^я метър, гранодиоритите са непроменени, здрави, плътни, среднозърнести. Същият тип гранодиорити изграждат вместиращия масив в участъка от 470^я м до края на тунела.

Изветрелите гранодиорити се простират от 280^я ÷ 300^я метър и от 440^я до 470^я метър, т.е. в частите от трасето, където тунелът ще влезе и съответно излезе от участъка на техногенния насип. В дълбочина дезинтеграцията му намалява и се интегрира към системите пукнатини, нарушаващи непроменените гранодиорити, представени в района.

Естественният скален масив е нарушен от снопове тектонски разломи, локализирани основно в частта от входа на тунела до

техногенния насип. В разглежданите материали има само данни за тяхното разпределение, без кинематични характеристики на придвижванията по тях.

Извършени са конвенционални изследвания на напукаността на масива от проектната зона. Системите пукнатини, както вече бе отбелязано, са с различно проявление и интензитет. В проблемната зона, в началото на трасето, системите са две, като по дължината му броят им нараства, и в крайната част установените системи пукнатини са пет.

Техногенният насип се състои от късове, основно интрузивни скали – гранодиорити, диоритови и гранодиоритови порфирити, хорнфелзи и метаморфни шисти. Насипът е изграден при строежа на рудника, преди повече от 15 години, той е уплътнен и консолидиращ се в дълбочина, където са и по-едриите късове, формиращи долната му част.

По геоложки признаци, по степен на вторични изменения и по нарушеност, масивът по дължината на проектната зона е разделен на пет участъка. На фиг. 4 е показан геоложки разрез по оста на тунела, където участъците са означени от началото – руднична „чаша“ към края при съществуващия КЕТ.

II.2. Физикомеханични свойства на скалите (ФМС)

Свойствата на изграждащите североизточната част на вместващия масив скали, са от проучвания извършвани през 1968 г., както и по данни от изследвания над кота 1000 м, от 1996, 2003, 2004 и 2005 г. Обобщените резултатите от тях са показани в табл. II.1.

Проучванията тогава са изпълнени съгласно Стандартни методи на геотехниката и изискванията на Наредба 1/1996 на МРРБ. При тях са определяни якостните характеристики на опън и натиск, а кохезията и ъгълът на вътрешно триене е определен само на три пробни тела. В таблицата няма данни за участък MV, определен като участък с напукан гранодиорит.

Таблица II.1.

Обобщени данни за ФМС на скалите от налични до старта на проекта лабораторни изпитания

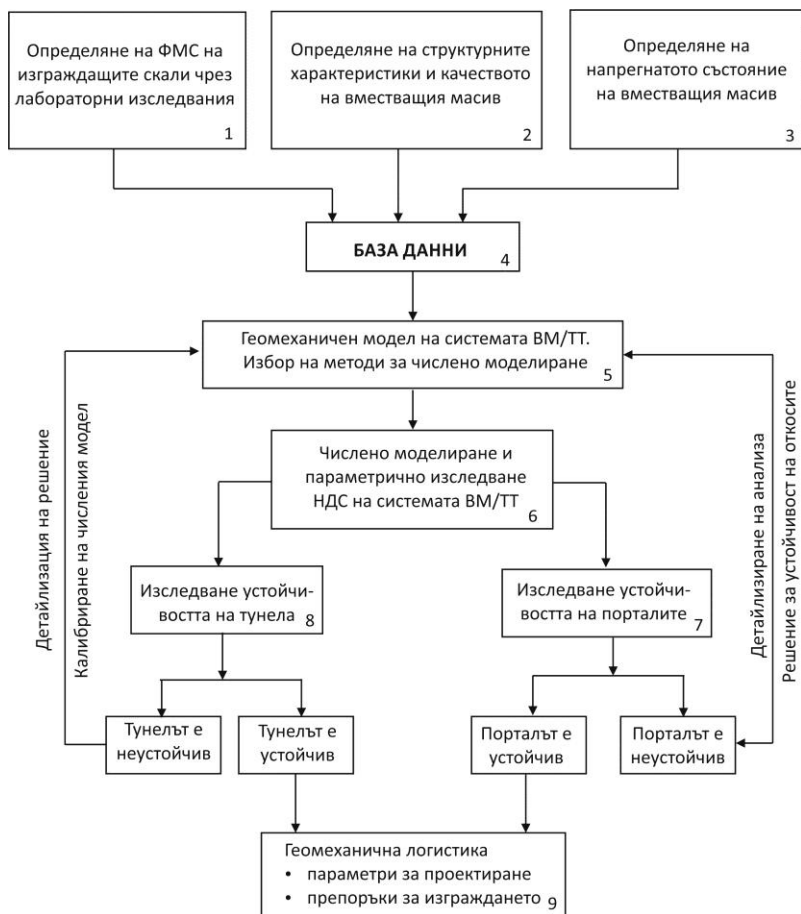
Физико-механични показатели	Гранодиорити	
	Хидротермално променени	непроменени
Якост на натиск [MPa]	25 – 70 45	100 – 170 127
Якост на опън [MPa]	9	12
Кохезия [MPa]	10,3	14,64
Ъгъл на вътрешно триене [°]	28,3	28,36
Обемна плътност [g/cm ³]	2,64	2,62
Обем на порите [%]	3,27	4,9

За ФМС на скалите от пети участък, без допълнителна информация, свойствата са приети за аналогични на тези, посочени в табл. II.1, като хидротермално променени скали. За физикомеханическите характеристики на скалите от техногенния насип, освен измерване на обемното тегло, други характеристики не са определяни, а са приети по нормативи както следва: обемно тегло 2,13 – 2,29 g/cm³, кохезия $c = 0$, ъгъл на естествен откос в сухо състояние 45° и ъгъл на вътрешно триене 40°.

Зоната на тунела, съгласно сеизмичното райониране на България е от VIII степен на интензивност и има сеизмичен коефициент $K_c = 0,15$. Цитираната налична информация не съответства на съвременните изисквания, съгласно ISRM.

II.3. Методология на геомеханичната логистика на проектирането и строителството на транспортния тунел на рудник „Елаците“

Въз основа на обзора, наличните данни, научната инфраструктура, с която разполагаме обхващат и целите и задачите на дисертационния труд е създадената методология, представена на фиг. 5.



Фиг. 5. Блок-схема на методологията за геомеханична логистика на проекта и строителството на транспортния тунел

Основните групи фактори, определящи НДС на системата ВМ/ТТ са механичните свойства и структурните характеристики, напрегнатото състояние и мащабите на технологичните въздействия, свързани с изкопаването.

Тяхното познаване обуславя необходимостта от създаването на система (свкупност) от методи за идентификация, оценка,

прогнозиране и контрол на геомеханичното състояние и механичните процеси в масива, с цел планиране на въздействие върху онези от изложените по-горе фактори, които може да бъдат управлявани. Тези обстоятелства определят целите на методологията – научно-информационна логистика, базираща се на комплексни и системни геомеханични изследвания на ключовите групи геомеханични фактори на състоянието за всеки от етапите – проучване, проектиране, строителство и експлоатацията на транспортния тунел на рудник „Елаците“, по всеки фактор от изброените групи. Същите упоменати по-горе фактори, по същество дават възможност за обща оценка на техногенния риск, условията на труд и ефективността на проекта, също възприети от нас за задачи на представената тук методология.

Методологията трябва да удовлетворява следните условия:

- да осигури комплексна логистика на проектирането и изграждането на транспортния тунел, в съответствие с препоръките на ИТА;
- да отчита специфични особености и ограничения в района на проектната зона и проекта;
- да представлява оптимално съчетание на лабораторни, експериментални методи, съобразена със съответните им технически възможности, за определянето на необходимите и достатъчни по обем и представителност, количествени параметри, за инженерните разчети и начина на изграждане на съоръжението.

Приложението на методологията трябва да осигурява количествено още следните потребности на проекта: да дава възможности за идентификация и количествено определяне на критичните геоложки и геотехнически фактори, влияещи върху изпълнението на проекта; да осигури прогнозирането на вида и мащаба на процесите, индуцирани в масива от технологичните въздействия в процеса на строителството (пробиване, взривно разрушаване, разуплътняване и др.п.).

Оценката на тези ключови фактори се извършва чрез параметричен анализ, посредством числено моделиране. Изборът на адекватен модел и неговата коректна работа зависят

изключително от надеждността, достоверността и точността на определяне на т.н. параметри на състоянието, които са входните характеристики и фактически създават (определят) граничните условия и успеха на численото изследване.

В смисълът на изложеното, една от основните и най-съществени подцели на методологията е създаването на многомерна база данни за пълната характеристика и квантификация на качеството на масива, необходими още за детайлизация на проектните решения, при необходимост.

Представената методология и планираните в нея изследвания са базирани на предварителни посещения, преглед и анализ на наличната текстова, графична и цифрова информация относно геологията, строежа, хидрогеоложката обстановка и данните от извършени изпитвания на свойствата на скалите от зоната на проекта.

За целта допълнително са определени възможните местоположения за прокарване на ядрови сондажи от повърхността за получаване на представителни образци от всички типове скали за лабораторните изпитвания. Сондажите са планирани така, че да се определи директно качеството на скалите по извадената ядка (RQD) [16], както и характеристиките на пукнатините по направление на сондажните оси, в обхвата на тунела.

В заключение, е необходимо да се отбележи, че оценката на предложената методология, относно структурата, съдържанието и възможностите ѝ за комплексното осигуряване на геомеханична логистика на всеки геотехнически проект, може да бъде дадена само и единствено чрез експерименталното ѝ приложение. Това обстоятелство определя плана на изследванията и анализа на резултатите от тях, на което са посветени следващите глави на предлагания дисертационен труд.

III. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НА СКАЛНИЯ МАСИВ В ОБХВАТА НА ТУНЕЛА

III.1. Лабораторни изследвания за определяне на физико-механическите свойства (ФМС) на скалите, изграждащи вместващия масив

От допълнително прокараните сондажи С1 (49 м) и С2 (38 м) са изготвени шест серии пробни тела, съдържащи 34 образци от представените литоложки разновидности (фиг. 8) за определяне на плътностите, якостните и деформационните им характеристики в едномерно и обемно напрегнати състояния.



Фиг. 8.

Получените резултати са обобщени в табл. III.1.

- Не характеризират проектната зона. Най-близките, до зоната ядрови проучвателни сондажи, за осигуряването на пробни тела са сондажи №№, С45 и С32. Прокарани са в скалите от непроменен гранодиорит, около входния портал на тунела, на разстояние, съответно 66, 93 и 137 м, което прави апроксимацията им, неприемлива. В останалата част от масива, по дължината на трасето проучвателни сондажи липсват, респективно няма данни за лабораторните свойства на скалите, необходими за характеристика на вместващия масив.

- Лабораторните изпитвания са правени, съгласно действащите тогава стандарти, които не отговарят на стандартите и препоръките на ISRM [18] и ITA [83].

Тези обстоятелства налагат необходимост от прокарането на допълнителни ядрови проучвателни сондажи, от повърхността. След предварителни посещения на района, в съответствие с целите на изследването е планирано местоположението им и са прокарани два ядрови сондажа, обозначени с С1 и С2 (вж. фиг. 4). Параметрите на сондажите (място, дълбочина, наклон) са подбрани така, че да осигурят пробни тела за изследването на всичките, представени в зоната на проекта литоложки разновидности. Сондаж С1 е дълбок 49 м, сондаж С2 – 38 м, така че покриват зоната и в дълбочина – краищата им са на 5 м под нивото на залагане на транспортния тунел. Структурните колонки, стратиграфския строеж и описанията на сондажите са показани на фигури 6 и 7, където е приложена и легендата към тях.

Освен получаването на пробни тела за лабораторните изследвани, данните от сондирането са използвани още за:

- актуализация на разпределението на изграждащите типове скали в зоната;
- идентификация на структурни особености и определяне на размерите и ориентацията на структурните нарушения (пукнатини, разломи) чрез програмата GeoCalculator;
- актуализация и детайлизация на геоложкия разрез на проектната зона;
- избор на представителни пробни тела за изготвяне на образци, предвидени за видовете лабораторни изпитвания в съответствие с методологията.

От пробните тела, транспортирани в херметизирани полиетиленови опаковки, в добро физическо състояние и съхранена естествена влажност, в лабораторията по механика на скалите на ЕВРОТЕСТ-КОНТРОЛ ЕАД са изготвени 34 броя стандартни (ISRM) образци, разпределени в шест серии от непроменените, променените и напукани гранодиорити, през които минава тунелното трасе.

На фиг. 8 е показана една серия от подготвените за изследвания образци.

Лабораторните изследвания включват методи за определяне на следните параметри и характеристики:

- обемна плътност γ [MN/m^3];
- порестост P [%];
- вода в порите W [%];
- якост на едноосов натиск σ_c [MPa];
- якост на опън (Бразилски тест) σ_t [MPa];
- построяване на якостни паспорти по върхови натоварвания;
- построяване на якостни паспорти в обемно напрегнато състояние;
- построяване на пълните деформационни диаграми на видовете скали;
- определяне на модул на еластичност E [GPa];
- определяне на кохезията C [MPa] и ъгъла на вътрешно триене φ , при върхова якост и в обемно напрегнато състояние.

Получените резултати от извършените допълнителни якостни изследвания за различните типове гранодиорити са показани в табл. III.1.

Таблица III.1

Лабораторни данни за ФМС на видовете скали, изграждащи зоната на тунела**

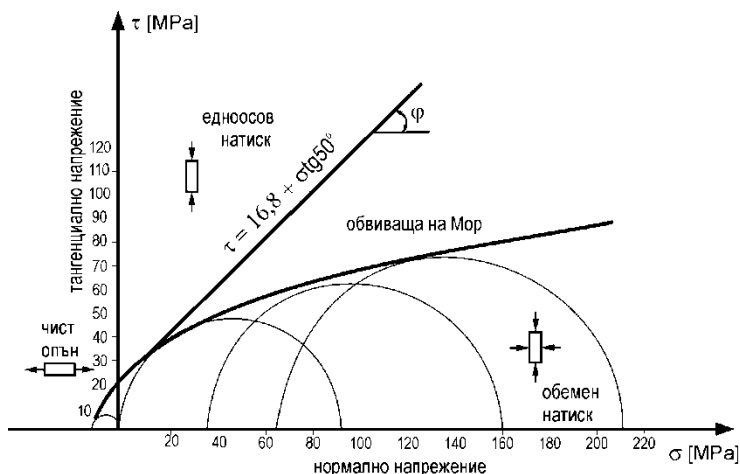
Параметър Лито- ложки тип	Специ- фична плътност, γ [MN/m^3]	Порес- тост, P [%]	Съдър- жание на вода в порите w [%]	Якост на едноосов натиск, σ_c [MPa] min/max	Якост на опън, σ_t [MPa] min/max	Кохезия C [MPa] ЕН/ОН	Ъгъл на вътрешно триене, φ [°] ЕН/ОН
Непроменен гранодиорит	0,0265	2,9	2	86/120	10/12	16,8/6	50/32
Променен гранодиорит	0,0263	6,6	3,8	34/40	6/7,4	14,7/6	52/36
Напукан гранодиорит	0,0263	3,0	2,2	49/66	8/9,5	19,7/10	49/35

** В колоните за кохезията и ъгълът на вътрешно триене, индексите ЕН/ОН означават получените стойности от изпитванията на едноосов и обемен натиск.

Крайната цел на всяко якостно изследване е построяването на паспортите на якост за дадения вид скала, даващ връзката между

тангенциалното и нормалните напрежения при разрушаване чрез критерия на Мор-Кулон. В описваните изследвания са построявани и двата вида паспорти – за едномерно и обемно напрегнато състояние, наричани по долу в текста паспорти по върхови якости и обобщен паспорт на якост.

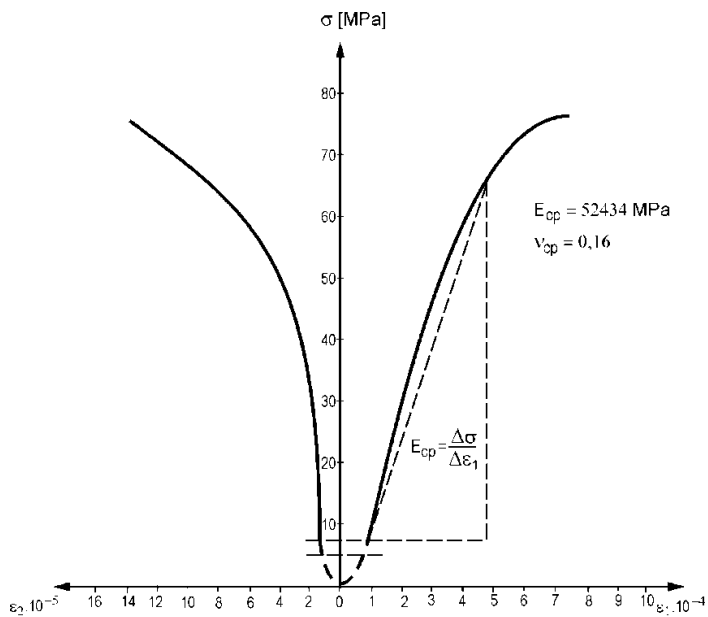
Тук за икономия на място ще покажем само едно построение за непрекъснат гранодиорит от участък М1.



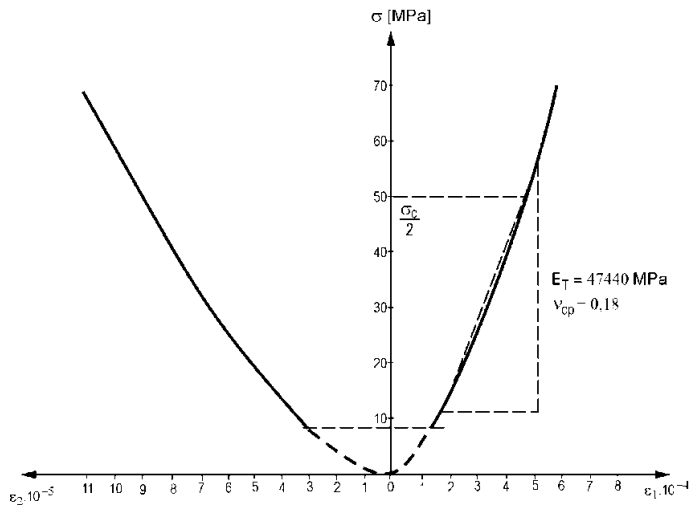
а) непроменен гранодиорит

Фиг. 9. Съвместени паспорти на якост на скалите за видовете гранодиорити

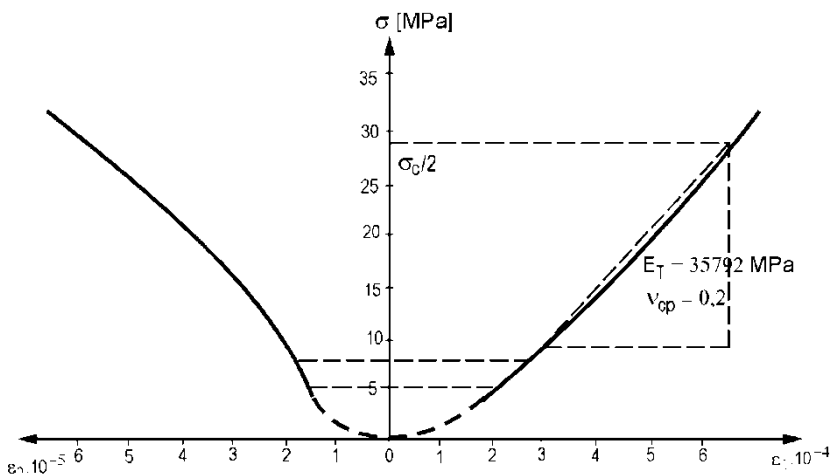
Извършени са деформационни изпитвания и са построени пълните деформационни диаграми на трите представени типове скали (σ – ϵ) и е анализирано деформационното поведение на всяка литоложка разновидност. На фиг. 10 са показани обобщено пълните, деформационни диаграми на скалите от проектната зона, а в табл. III.2 съдържа деформационните параметри, получени от лабораторните тестове. Изследването показва поведение на ненарушените, изграждащи масива скали като еластично-вискозно.



а) образец от непроменен гранодиорит



б) образец от напукан гранодиорит



в) образец от променен гранодиорит

Фиг. 10. σ – ε диаграми на образци от видовете скали, изграждащи вместващия тунела масив

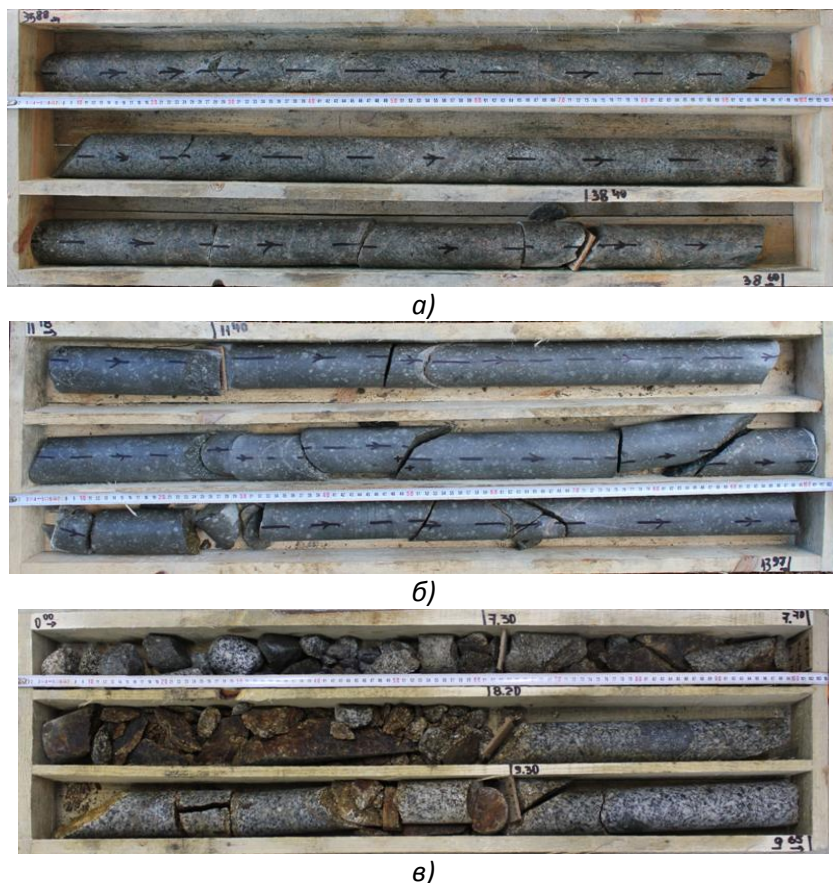
Таблица III.2

Деформационни параметри по лабораторни данни

Лито- ложки тип \ Параметър	Якост на ЕН, σ_c [MPa] max/min	Еластичен модул, E [GPa] max/min	Модул на плъзгане, G [GPa] max/min	Коефи- циент на Поасон ν_{cp}
Непроменен гранодиорит	120/100	0,14/0,055	0,06/0,023	0,16
Напукан гранодиорит	65/49	0,048/0,035	0,02/0,0145	0,2
Променен гранодиорит	54/40	0,03/0,023	0,09/0,07	0,25

III.2. Структурни характеристики и класификация на масива

Структурната характеризация на вместващия проектната зона масив е базирана на резултатите от детайлното проучване на ядковия материал (получен от допълнителните сондажи С₁ и С₃ и наличната информация за изследвания на нарушеността на масива.



Фиг. 12. Част от ядките, получени от контролните сондажи:
а) непроменени (MI), б) променените (MIV) и в) напукани (MV)
гранодиорити

За всяка представена литоложка единица, по сондажните данни, директно са определяни качеството на скалите по

изважданата ядка (Rock Quality Designation, RQD), както и специфичните геомеханични характеристики на нарушенията, определящи тангенциалната им якост – профил, коефициентите на грапавост (JRC) и стенна якост JCS, контактните условия, наличие и вид на запълнение и водопропускливост на системите пукнатини [18]. Описаните характеристики са локални. За да се „окачества“ геомеханично целия масив, от нас е извършено следното. Горните характеристики са приети за реперни и са базовите показатели за категоризиране на масива по цялата му дължина, чрез геомеханичните класификации RMR, Q, като е приложена зависимостта на Палстрьом [16].

В изследването са приложени независимо двете най-известни системи – RMR (Рейтинг на скалния масив) на Биениявски и Q системата на Бартон за качеството на масива, използвани в тунелостроенето. Отначало е направено едно общо окачествяване на целия масив по линията на трасето, а чрез получените стойности за RMR и Q са определени и оценени обхватите на изменчивост и чрез тях е извършено разделянето на масива – на непроменените, променените и напукани гранодиорити (MI, MII, MIV и участък MIII, като несвързана среда), след което и двете системи са приложени независимо, за всеки участък по отделно. Накрая чрез въведения от Хоек GSI метод е извършено окончателното геомеханично окачествяване на масива по участъци, показано на фиг. 13 и табл. III.3.

GENERALISED HOEK-BROWN CRITERION		STRUCTURE	SURFACE CONDITION					
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^\alpha$ σ_1' = major principal effective stress at failure σ_3' = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of <i>intact</i> pieces of rock m_b, s and α are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass								
				VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	m_b/m_i s α E_m v GSI	0.60 0.190 0.5 75,000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34	
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	m_b/m_i s α E_m v GSI	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	63±2 MI	59±2 MV	57±5 MII=IV	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.53 2,500 0.3 25
	BLOCKY/SEAMY - folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks	m_b/m_i s α E_m v GSI	0.24 0.012 0.5 18,000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	
	CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks	m_b/m_i s α E_m v GSI	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	10±5 MIII	

Фиг. 13. Класификационни диапазони на връзките RMR/GSI и параметрите на H-B критерия за изграждащите литоложки единици

Таблица III.3

Лито- ложки тип Пара- метър	Непроменен гранодиорит	Променен гранодиорит	Напукан гранодиорит
RMR	68, II клас Добри скали	62 – 60, III – II клас Задоволи- телни/ добри скали	64, II – III клас Добри/задово- лителни скали
GSI	63 ± 2	57 ± 5	59 ± 2
Q	14,39 Категория B	7,3 Категория C	9,23 Категория C
Струк- турна наруше- ност	Две системи пукнатини. Концентрация на разломни нарушения	Три системи пукнатини и една несистемна	Четири и повече системи пукнатини

Както е видно от фиг. 13 и таблица III.3 качеството на представените в проектната зона гранодиорити са в диапазона добри/задоволителни скали.

Полученият рейтинг на качеството на вместващия масив и лабораторните данни, и стойностите на геоложкия индекс за якост (GSI), са използвани за последващ анализ на задпределното поведение на вместващия масив чрез определянето на еквивалентните якостно-деформационни характеристики и материалните константи m и S на критерия на Хоек-Браун. Известно е, че критерият на Хоек-Браун директно се използва при численото моделиране. Стойностите на GSI индекса на фиг. 13 са означени с кръгчета. За скалите изграждащи естествения масив GSI, общо се движи в границите 52–65, което означава, че геомехничното състояние и поведение на генетично еднотипните разновидности по отделните участъци ще се диференцират само по степен на

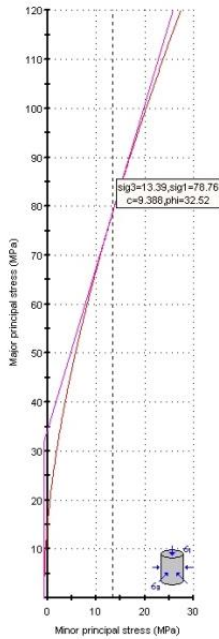
нарушеност и/или вторични изменения. И в трите участъка MI, MIV и MII масивът е изграден от взаимно заключени блокове, формирани от 3 до 4 системи пукнатини. Участъкът образуван от насипа е с изключително нисък GSI (вж фиг. 13). Техногенният масив, въпреки дългогодишната си консолидация, се определя като лошо контактуващи натрошени блокове със закръглени повърхности и неустойчиво геомеханично състояние, поради ниската тангенциална якост срещу придвижвания.

Известно е, че моделът на Хоек-Браун е базиран на поведението на непрекъсната, нелинейна среда. Критерият на разрушаване при него е с координати σ_1 , σ_3 , но задпределното състояние може да бъде анализирано и чрез критерия на Мор-Кулон. Тази възможност, в описаните изследвания, е използвана чрез прилагането на софтуера на RocLab [109] за определянето на връзката между главните напрежения (σ_1 , σ_3) и тангенциалните и нормални (τ , σ) напрежения.

На фиг. 14. са показани резултатите за участък MI.

Резултатите от всички структурни и лабораторни изследвания са обработени по методиката и софтуера на RocLab [109] за определянето на характеристиките на задпределното (Post failure) състояние на нарушения масив. Обработката е базирана на трите групи данни (лабораторните, класификационните, определянето на GSI индекс), а оценката е въз основата на H-B критерия за осигуряване входните на параметрите на състоянието, необходими за численото моделиране. Тези характеристики са показани в таблица III.4.

Analysis of Rock Strength using RocLab

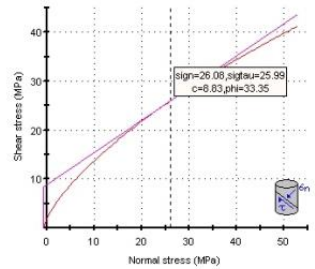


Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial compressive strength = 110 MPa
 OSI = 64 m = 10 Disturbance factor = 0

Hoek-Brown Criterion
 mb = 2.765 s = 0.0183 a = 0.502

Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 6.941 MPa friction angle = 34.61 deg

Rock Mass Parameters
 tensile strength = -0.729 MPa
 uniaxial compressive strength = 14.761 MPa
 global strength = 26.444 MPa
 modulus of deformation = 22387.21 MPa



a) Участък MI

Фиг. 14. Анализ на якостните параметри на литоложките разновидности чрез взаимовръзките между критериите за разрушаване Н-В/М-С [107]

Таблица III.4.

Характеристики на масива, определени чрез RocLab [109]

Geomechanical properties	Unaltered granodiorite	Altered granodiorite	Fractured granodiorite
σ_{ucs} [MPa] (average results from table 1)	120	40	49
H-B constant m_i Hoek–Brown constant m_i	10	10	10
GSI Geological Strength Index (from table 2)	63±2	57±5	59±2
H-B constant m_b	2.668	2.153	2.312
H-B constant s	0.0166	0.0084	0.0105
Constant a	0.502	0.504	0.503
Modulus of elasticity E [MPa]	12000	1200	12000
Cohesion C [MPa]	7.434	2.232	2.829
Friction angle ϕ'	34°32'	32°57'	33°16'
Rock mass tensile strength [MPa]	- 0.737	- 0.156	- 0.223
σ_{ucs}^M Rock mass maximum compressive strength [MPa]	15.219	3.610	4.954
Global strength σ_{gs} [MPa]	28.149	8.150	10.453
Deformation modulus E_m [MPa]	7053	5427	5968

Въз основа на съвместното и независимо приложение на системите RMR и Q за определяне на геомеханичното състояние и оценяването на частите от вместващия масив, изграден от представените типове гранодиорити, са дадени ,

емпиричните препоръки за прокарването, закрепването на тунела, систематизирани в таблица III.5.*

Таблица III.5

Изграждащи скали RMR клас, Q	прокарване	крепеж	коментар
Непроменен гранодиорит RMR=68, II клас Q=14,39, категория B	ПВР, по цялото тунелно сечение, 1-1,5 м напредък	Локално анкериране на горнището, дължина 3 м, разстояние 2,5 м и локално торкретиране, мрежа при необходимост	Време на стоене без крепеж 2 месеца. Наличие на разломи и 2 системи пукнатини с благоприятна ориентация. Локално изтичане на вода по разломите
Изветрял гранодиорит RMR=62-60, III-II клас Q=7,3, категория C	ПВР, взривяване по цялото сечение, а при необходимост низходящо слоево прокарване	Систематичен предварителен крепеж след всяко взривяване. Постоянен крепеж 20 м от забоя, мрежа, торкрет 50-100 мм	Време на стоене < 1 месец. 4 системи пукнатини, 2 от тях с неблагоприятна ориентация
Напукан гранодиорит RMR=64, II-III клас Q=9,23, категория C	ПВР, напредък 1-1,5 м в сводовата част на тунела. Закрепване с анкери при необходимост	Временен крепеж след взривяването. Постоянен крепеж на 10 м от забоя, мрежа или торкрет 50 мм, където е необходимо	Време на стоене без крепеж < 1 месец. Множество (>4) системи ориентирани, глинени пълнеж и вода в изветрелия слой

Всичките получени и описани до тук лабораторни и in situ геомеханични характеристики са използвани за структурирането на многомерната база данни, позволяваща обобщена и детайлна

* Емпиричните препоръки се отнасят само за участващите естествен масив.

характеризация на скалите и масива, вместиращ транспортния тунел, за закрепването на последващия параметричен анализ, чрез численото моделиране.

Изследванията за характеристика на масива (базови за всяка следваща фаза) са изпълнявани при съблюдаване на следните условия:

- спазване на стандартите на ISRM;
- съответствие с добрите световни практики;
- осигуряване на максимална комплексност, а именно:

III.3. Изводи и заключения

1. Извършени са комплексни лабораторни изпитвания на образци от разновидностите скали, изграждащи вместиращия масив. Определени са якостните характеристики в едномерно и обемно напрегнато състояние. Изследвано е деформационното поведение, определени са еластичните константи и са построени паспортите на якост по критерия Мор-Кулон за всеки литоложки тип, по върхови данни и при всестранен натиск.

2. Изследвани са структурната нарушеност в обхвата на контролните сондажи, определени са характеристиките на пресечните от тях системи пукнатини (RQD, JSC, JRC). Приложен е метода на Палстрьом за характеристика на структурната нарушеност на целия масив в обхвата на тунела, като чрез този подход е извършена апроксимация на наличните данни от конвенционални изследвания на напукаността, сравнявана с директно определяните по данните от сондирането.

3. Извършени са класификации на скалния масив по оста на тунела чрез геомеханичните системи RMR и Q. Оценена е изменчивостта на „качеството“ на вместиращия масив, след което рейтингите за качество са реализирани по участъци и са използвани за формулиране на емпиричните препоръки (табл. III.5) относно начините на прокарването и закрепването на всеки от тях.

4. В резултат от лабораторните и структурните изследвания е съставена многомерна база данни за комплексна количествена

характеризация на масива, осигуряваща планирания параметричен анализ и разчетите в инженерния проект на транспортен тунел Елаците.

IV. ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАПРЕГНАТОТО СЪСТОЯНИЕ НА МАСИВА

Основната характеристика, необходима във всеки аспект и етап на проектиране, строителство и експлоатацията на всяко геоинженерно съоръжение, е напрегнатото състояние на вместващия съоръжението масив.

Изследването на напрегнатото състояние на вместващия тунела масив в случая е извършено в следната методическа последователност: експертна, диагностична и експериментална.

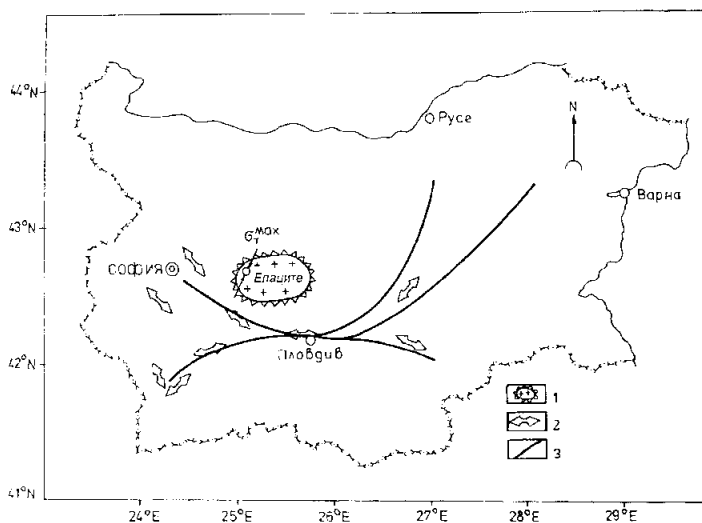
1. Експертната оценка на генотипа на естественото поле на напреженията е базирана на анализ на алтернативите:

- налични ли са, или не качествени признаци за проява на тектонски компоненти в конфигурацията на естественото поле;
- ако такива компоненти са вероятни, какво е направлението им на действие в района на тунела.

2. Диагностиката и разпределението на тектонски генотип поле се извършва чрез анализ на установени геоложки, тектонофизични и сеизмологични данни за строежа, тектониката и сеизмичността на района.

3. Експерименталният подход е основан на приложението на специализирани инструментални методи за количествено определяне на магнитудите и ориентацията на компонентите на полетата на напрежения *in situ*.

Експертната оценка, базирана на наличната и допълнително събрана от нас информация, отразени на фиг. 15.1., предполага поява и проява на тектонски сили, респективно наличието на действащи и/или остатъчни тектонски натискови (хоризонтални и/или субхоризонтални) тектонски напрежения.

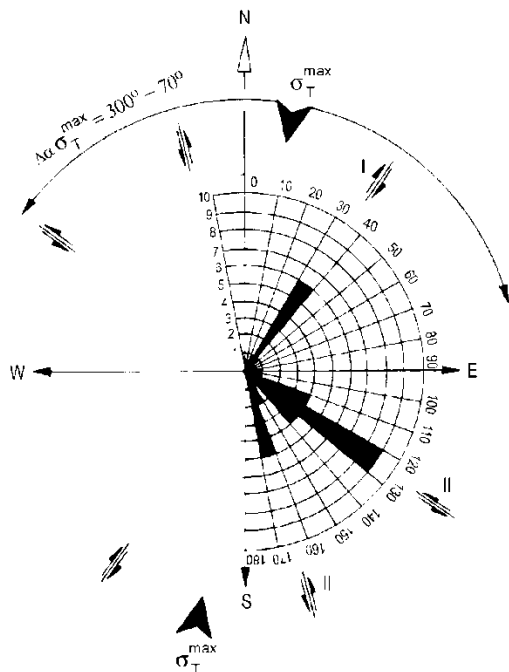


Фиг. 15. 1 – граници на регионалната зона на издигане; 2 – направление на регионалните разломни структури; 3 – линии на концентрация на епицентровете на сеизмичните огнища в региона

Предполагаемото разпределение на тектонските компоненти в региона, получено след анализа е субмеридиален хоризонтален натиск в напрежение СЗ/СИ, както е показано на фигурата.

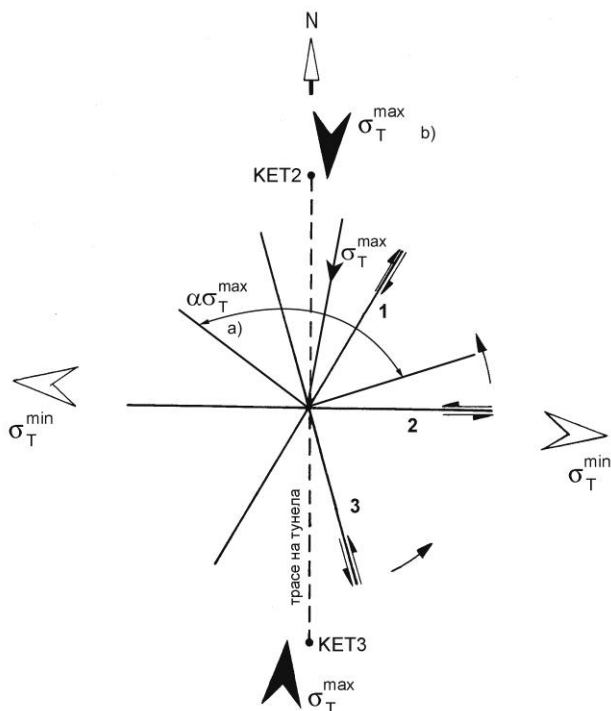
Диагностиката на естественото поле на напрежение е извършена на два етапа – за цялото находище и за района на тунела по метода на реконструкция, чрез анализ на характеристиките (размерност, разпределение и кинематика) на тектонските нарушения.

Резултатите от тези анализи и ориентацията на максимална тектонска натискава компонента за находището е показана на фиг. 16.



Фиг. 16. Кръгова диаграма на азимутално разпределени на разломите в находището, $\sigma_T^{\max}$ - направление на максималния тектонски натиск; $\Delta\alpha\sigma_T^{\max}$ - диапазон на изменение на ориентацията на максималното тектонско напрежение в тектонската история на находището

На фигура 18 е показана реконструкцията на естественото поле за проблемния участък с ориентацията на минималното ($\sigma_T^{\min}$) и максималното ($\sigma_T^{\max}$) напрежения, с отчитане и на ориентацията на тунела, относно тектонските компоненти на естественото поле.



Фиг. 18. Окончателно разпределение на естествено поле на напрежения в района на транспортен тунел „Елаците“

IV.1. Експериментално изследване на напрегнатото състояние in situ

Планирането на in situ изследването на напрегнатото състояние на масива е базирано въз основа на описаните по-горе резултати, така и чрез сравнителен анализ между най-прилаганите, приложими и за двата метода – деформационните. Сравнявани са техниката на провеждане, математичния модел, информативността им и точността им на измерване. Избран е известен метод на основа на частичното разтоварване на измерителната розетка, в които са извършени съществени изменения, осигуряващи определени метрологични предимства – нова измерителна розетка с увеличен

брой независими направления на измерване, приложено е пълно разтоварване на измерителната площадка. Разработена е методика, допълнително и спомагателно оборудване, целящи повишаване на чувствителността, надеждността и точността на измерване. Резултатите от експерименталните измервания са получени в участък МІ – най-подходящия за извършване на експериментите, показани са в таблица IV.3, а на фиг. 23 е показана фотосесия на основните фази на експеримента.

Таблица IV.3.

Резултати от in situ измерване на напреженията в зоната на транспортния тунел

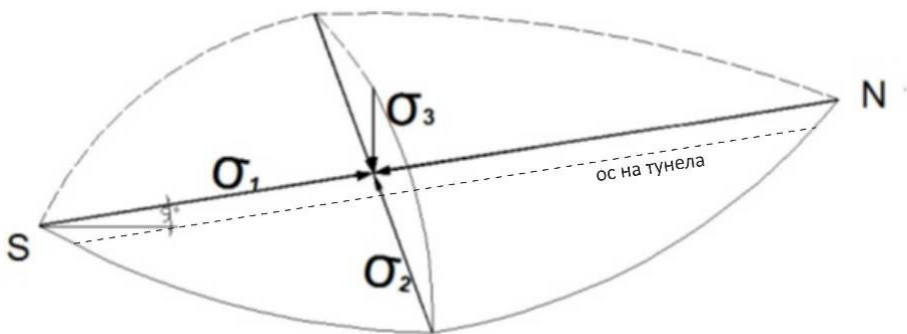
Главни на-прежения	Маг-нитуд [МПа]	Ориента-ция Азимут/наклон $\alpha[^\circ]$, β %	Съотно-шение	Разпреде-ление	Геоста-тична хипотеза
σ_1	3,94 – 4,84	$\alpha = 355^\circ$ $\beta = -30^\circ$	3	Субхоризон-тално, по оста на тунела	$\sigma_x = \sigma_y =$ = 0,36÷0,4 6 МПа
σ_2	2,71 – 3,22	$\alpha = 260^\circ$ $\beta = 26,5^\circ$	2	Субхоризон-тално, нормално на тунелната ос	
σ_3	1,27 – 1,44	зенитен ъгъл 90° – 95°	1	Вертикално	$\sigma_{\text{верт}} =$ = 1,8÷2,4 МПа



Фиг. 23. Фотосесия на основните етапи на експеримента по метода на пълното разтоварване на открити повърхности

След обработката на резултатите, от експериментите в двете измерителни станции, на фиг. 24 е показана конфигурацията на резултантното поле на трасето в обхвата на целия тунел.

Дадена е също геомеханична оценка на *in situ* експеримента чрез резултатите от изследването и е оценена конфигурацията на резултантното поле чрез модифицирания вариант на метода за измерване на напрежение.



Фиг. 24. Конфигурация на резултантното поле на напрежения, действащи в масива, в обхвата на тунела

V. ПАРАМЕТРИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА НДС НА СИСТЕМАТА ВМ/ТТ. ГЕОМЕХАНИЧНА УСТОЙЧИВОСТ НА АНАЛИЗ НА РИСКА, МЕХАНИЗМИ НА РАЗРУШАВАНЕ, ВЕРИФИКАЦИЯ НА ЛОГИСТИЧНИТЕ РЕШЕНИЯ

A. Напрегнато-деформирано състояние на системата

Съществен етап в структурирането, съставянето и приложението на логистичните решения е използването на методите за числено моделиране.

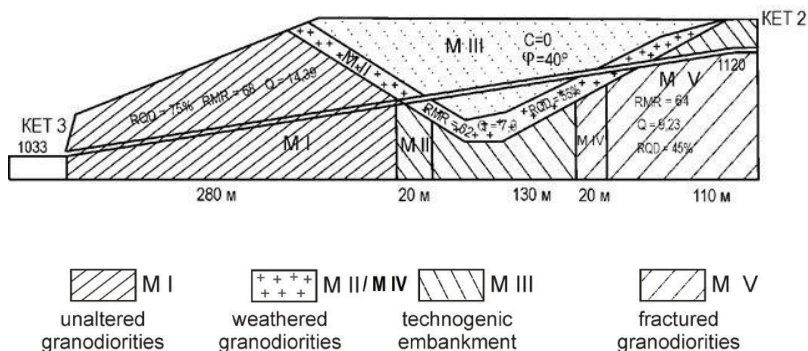
Построеният геомеханичен модел и създадената база данни, характеризиращи комплексно масива, са използвани при избора на методите за числено моделиране и местата на изчислителните сечения за параметричния анализ на посочената, по-горе система. За целите на анализа са избрани съвременните версии на софтуерите Phase² и SLIDE (W).

Размерите на изчислителните профили са избрани така, че границите им обхващат зоната на влияние на изработката. Граничните условия са зададени, чрез измерените компоненти на полетата на напрежение, а входните параметри на състоянието са от табл. II.1, II.2 и III.4 от базата данни за характеризацията на масива.

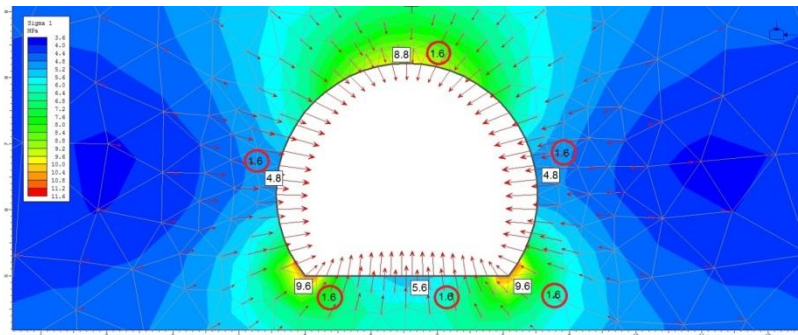
Областите на дискретизация на сеченията за всеки участък са определени, така че да обхванат най-неблагоприятните съчетания на геомеханичните фактори – максимални промени в действащите напрежения, а също на физикомеханичните и/или структурни характеристики на скалите; на контактните условия; влиянието на подземните води и т.н. чрез резултатите от численото моделиране са прогнозирани и графично са представени разпределението на напреженията на индуцираните полета, техния характер, очертавани са геометрията и размерите на зоните на концентрации. Програмата позволява автоматично определяне и изобразяване на големините и посоките на векторите на радиалните премествания на масива, както и необходимите за анализа стойности на коефициентите на сигурност, съгласно критериите на Хоек-Браун за съответните якости

(натиск, опън, тангенциална), в зоните на концентрация, развиващи се в скалния масив, непосредствено около контурите на тунела.

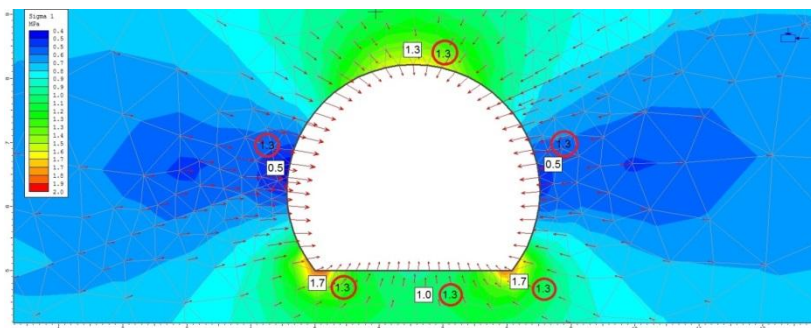
На фиг. 25, 26, 27 и 28 са показани геомеханичен модел и резултатите от анализа на НДС и устойчивостта на системата ВМ/ТТ по участъци, а в табл. V.1. те са в обобщен вид.



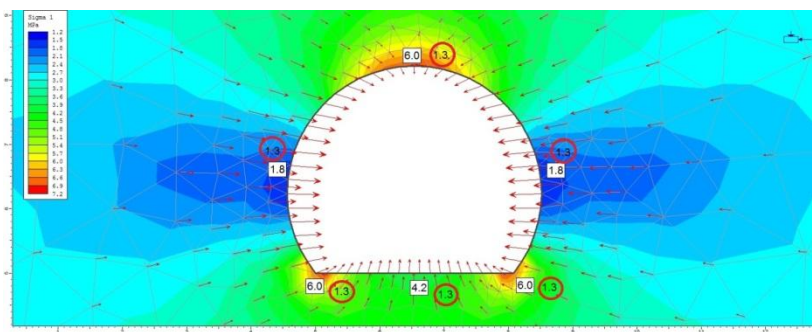
Фиг. 25. Геомеханичен модел на системата ВМ/ТТ на рудник „Елаците“



Фиг. 26. НДС на участък M I



Фиг. 27. НДС на участък MV



Фиг. 28. НДС на участъци MII $\equiv$ MIV

Това моделиране е използвано още за определяне и оценка на най-вероятните механизми на разрушаване от натиск (очакван в горнището) или срязване, или опън (по стените на тунела). Накрая, по резултатите от това моделиране е извършена проверка и е оценена адекватността на емпиричните препоръки, относно методите за изкопаване и закрепване на масива и тунела, за осигуряването му, при наличието на риск от загуба на устойчивост.

Таблица V.1.

Обобщени резултати от моделирането на НДС на вместващия масив

Характеристика Участък	Литология, якостна категория, геомеханичен клас на масива	местоположение	Макс. действащи напрежения в зоните на концентрация, МПа	Коефициент на концентрация K_k	Коефициент на местна устойчивост $K_{му}$	Статус
MI	Непроменени гранодиорити R δ , II клас, RMR=68	Г	8,8	1,7	1,6	Устойчивост
		Д	9,6	1,9	1,6	
MV	Напукани гранодиорити R4/R3, II-III клас, RMR=64	Г	1,3	1,1	1,3	Локална неустойчивост
		Д	1,7	1,42	1,3	
MII $\equiv$ MIV	Променени и изветрели гранодиорити R3/4, III-II клас, RMR=60-62	Г	6,0	1,8	1,3	Локална неустойчивост
		Д	6,0	1,8	1,3	

В таблицата са отразени само резултатите от моделирането за участъците MI, MV и MII $\equiv$ MIV, изградени от естествен скален масив. Резултатите са разпределени съответно на местоположението на зоните на концентрации, означени с Г – свод и Д – долнище на тунела.

Софтуерът Phase² изчислява автоматично векторите на мигновените (без наличието на крепеж) премествания, индуцирани

от прокарването на тунела. Те отразяват деформационното поведение на изграждащите конкретния участък скали. Тяхната големина и направление са различни и се определят от компонентите на действащите напрежения и свойствата на конкретния литоложки строеж, както това е видно от фиг. 25, 26 и 27, и табл. V.2.

Таблица V.2.

Деформационно поведение на вместващия тунелния изкоп масив

Характеристика Участък	Литология, якостна и геомеханична категория	Макс. Вертикална кон-вергенция, мм	Макс. хори-зонтална кон-вергенция, мм	Индекс по на-прегнатост на масива	Коефициент на формо-изменение	Моментно нама-ление на сече-нието м ²	Интен-зитет на дефор-мац. поведе-ние
MI	Непроменен гранодиорит Rδ, категория В Q = 14,39	0,34	0,58	1,72	-0,993	-0,15	среден
MV	Напукан гранодиорит R4/R3, категория С Q = 9,23	0,18	0,45	1,31	-0,991	-0,12	мини-мален
MII≡MIV	Променен и изветрял гранодиорит R3/4, категория С Q = 8,3	0,224	1,28	1,68	-0,973	-0,18	макси-мален

Б. Устойчивост на системата ВМ/ТТ, рискови фактори, механизъм на разрушаване при загуба на устойчивост

Едно от важните предимства в приложенията на параметричните изследвания при численото моделиране е възможността, която те дават за оценката на устойчивост на системата вместиращ масив/геоинженерно съоръжение (в случая ВМ/ТТ).

Анализите на устойчивостта на системата ВМ/ТТ по участъци става чрез определянето на FOS (Factor of stability), чрез емпиричния критерий на Хоек-Браун (НВ) по схемата якостни изпитвания – геомеханични класификации – GSI индекс – критериална оценка на нивото и типа разрушение.

Резултатите от този анализ, са означени в червени кръгчета на фиг. 25, 26, 27 и са показани в табл. V.1. От тях е видно, че коефициентът на устойчивост за участък MI, по целия периметър на сечението има стойност 1,6. За участъци MV и MII $\equiv$ MIV коефициентът е 1,3, също за всяка част от сечението на тунела.

Анализът на стойностите на FOS показват, че разрушения по контурите на тунела в отделните му участъци няма да произтекат и това е отразено от нас в таблица V.1, където допускаме, че в участъци MV и MII $\equiv$ MIV е възможно появата на локални обрушавания, вследствие на нарастващата напуканост, в направление Ю-С, след 350^я метър от входа на транспортния тунел.

Основните групи рискови фактори, определящи условията за успешна реализация на проекта, съхранявайки устойчивостта на системата ВМ/ТТ са:

- ФМС на скалите и структурните характеристики на масива;
- напрегнатото състояние на неговото изменение при прокарването;
- технологичните въздействия (напр. ПВР) върху горните групи, формиращи в своето взаимодействие НДС на системата, нейната устойчивост и цялостната геомеханична обстановка в района на транспортен тунел „Елаците“.

Комплексната оценка на риска в добрите световни практики включва в себе си и оценка на вероятността от индуцирана сеизмичност, която е приложена и в това изследване чрез определяне на чувствителността на системата ВМ/ТТ към нивото на индуцираната от изкопаването на тунела сеизмичност.

Склонността на скалите, изграждащи тунелна зона, по участъци, показана в табл. V.3, чрез прилаганите за тази цел критерии.

Таблица V.3.

Склонност на скалите към индуцирана сеизмичност и енергонасищане на вместващия масив

Критерии Участък изграждащи скали	Индекс по крехкост BI	Якостен индекс RSI	Напреженов индекс SI	Плътност на деформационна енергия SED [kJ/m ³]	Обща оценка на нивото на индуцирана сеизмичност
MI Непроменени гранодиорити	10	0,24	12,5	0,05	много ниска
MV Променени гранодиорити	7,3	0,33	9,0	0,05	много ниска
MII≡MIV напукани гранодиорити	6,8	0,08	38	0,04	много ниска

Обобщената оценка на НДС на системата ВМ/ТТ направена от нас е чрез оценката по метода напреженова траектория (Stress Path),

използвана основно в минната и геотехническа практика на Канада, САЩ, ЮАР и др.

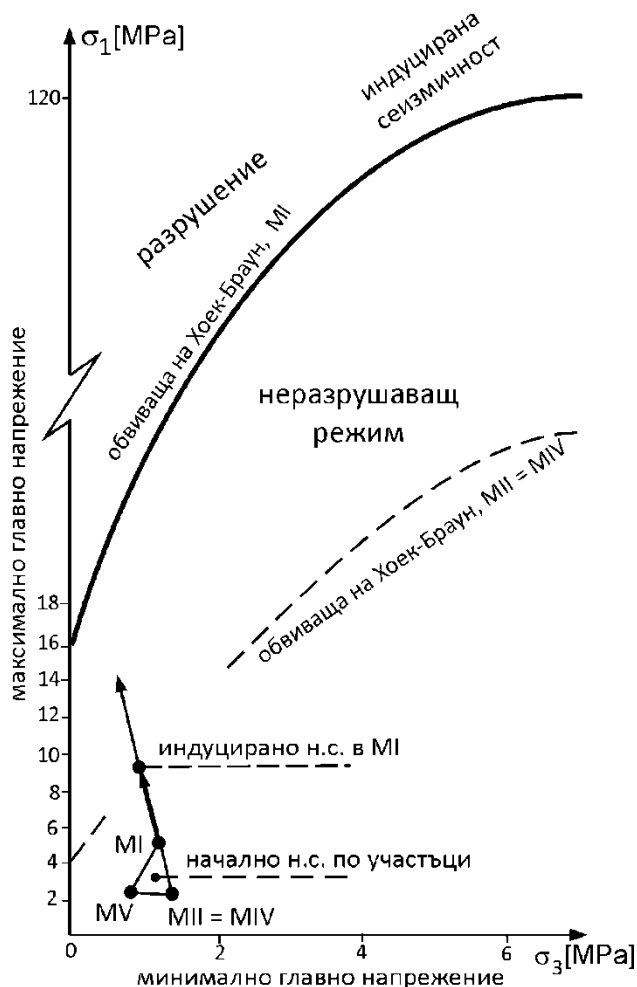
Конкретното приложение на метода за транспортния тунел Елаците е показано на фиг. 29.

Въз основа на натрупания опит от приложението на геомеханичната система за класификация RMR е създадена система от емпирични препоръки за първоначален, ориентиращ избор на система и начин на прокарване и за избор на крепежа на тунели, прокарвани в твърди скали, чрез ПВР за масива с напрежение до 25 МРа. Тя е приложена от нас, както бе отразено в табл. III.5 при следните условия:

- прокарването и закрепването на тунела да съответства на указанията за клас III (задоволителни скали);

- след първоначалните етапи на строителството и анализ на устойчивостта на тунела и прилагания крепеж, при положителна оценка, да се премине към облекчения режим за прокарване и крепене, съответстващ на клас II (добри скали).

Втората задача на числените изследвания, при изпълнението на проекти в тунелостроенето, е параметричен анализ на устойчивостта на откосите при порталите им. В случаят, е изследвана само устойчивостта на откоса при входа на тунела (южния портал, при КЕТ 2), тъй като изходът на тунела е свързан директно с КЕТ 3 и е част от конструкцията на съоръжението.

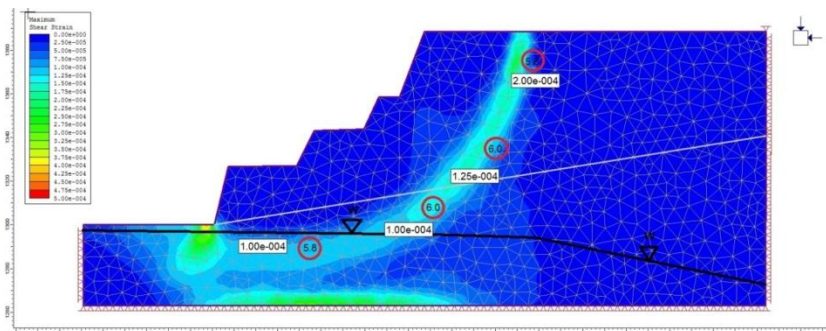


Фиг. 29. Метод на напреженовата траектория (Stress Path Approach [75]) за НДС в участък MI

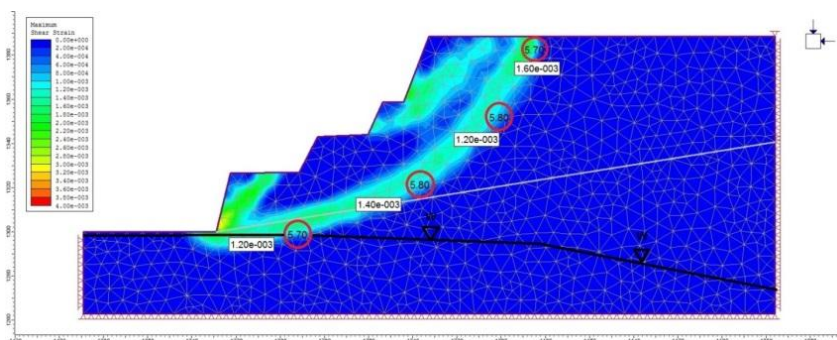
В. Параметричен анализ на устойчивостта на откоса при входа на транспортния тунел

Изследването на устойчивостта на откоса е извършено с използването на двата числени модела. На първия етап е използван

софтуер Phase², по метода SSR (загуба на тангенциална якост). Изследването е статично, базирано на теорията на граничното равновесие. Параметрите захранващи модела са от табл. III.4. Резултатите от този анализ, с оценка на устойчивостта, по критериите на Мор-Кулон и Хоек-Браун, са показани на фигури 30 и 31, съответно.



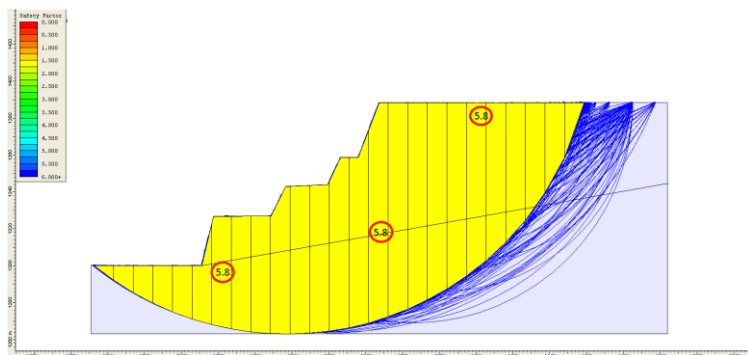
Фиг. 30. Анализ на устойчивостта на откоса чрез метода SSR, по критерия Мор-Кулон (MC)



Фиг. 31. Анализ на устойчивостта на откоси по метода SSR, чрез критерия на Хоек-Браун (HB)

Второто разследване на устойчивостта на южния откос е по опростения метод на Бишоп, чрез програмата SLIDE. Използвайки опцията IMPORT/EXPORT моделът и решенията на Phase² са транслирани в SLIDE, специализиран само за оценка на устойчивост

на откоси. Горните решения (получени чрез Phase²) са подложени и на кинематичен анализ, по метода на Бишоп. Резултатите са показани на фиг. 32.



Фиг. 32. Анализ на устойчивостта на откоса чрез софтуера SLIDE 6,0

От фигури 30, 31, 32 е видно, че въпреки малките различия в определените стойности на коефициента на устойчивост по статични и кинематични условия (чрез SSR и Бишоп) получените за тях стойности надхвърлят значително стойността 1,5. Тези резултати потвърждават отсъствието на проблеми в устойчивото състояние на откоса на тунела „Елаците“.

НАУЧНИ И НАУЧНОПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

А. НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Съставена е комбинация от методи и техники, наречена за краткост методология, даваща възможност за комплексно геомеханично осигуряване на проектирането и строителството на тунели, прокарвани в скални масиви. Методологията е с йерархична структура, в която съставляващите я методи (лабораторни, аналитични и *in situ*) са логистично взаимнообвързани, така че да позволяват количественото определяне на всички необходими и достатъчни за целта, геомеханични и геотехнически параметри, съгласно препоръките и стандартите на ISRM и ITA AITES в направлението тунелостроене (Tunnelling). Структурата, съдържанието и обхвата на методологията позволяват приложението не само в предметната област, но и в миннодобивната индустрия и останалите сфери на геотехническото, урбанистично и енергетично строителство, предназначени за усвояване и утилизация на подземните пространства.

2. Извършено е усъвършенстване на известен метод за *in situ* определяне на напреженията, действащи във вместващия тунелната изработка скален масив, с повишена технологичност, производителност, качество и надеждност на експеримента. За осигуряването на по-висока точност, информативност и достоверност на резултатите от измерването, в усъвършенствания му вариант са въведени следните по-важни изменения:

- Съставена е и е приложена нова, многокомпонентна измерителна розетка, с увеличен брой независими измервания на преместванията, при увеличена база на измерване, което осигурява приложението на статистически подход при обработката на резултатите от експеримента.

- Въведено е пълно разтоварване на измерителната площадка, с което е повишена чувствителността на метода, съответно разширяващо областта му на приложение в разнообразни условия.

- Създадено и е комплектувано съответно допълнително оборудване, осигуряващо качеството и реализацията на експеримента.

Б. ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

3. Методологията, в пълната ѝ комплексност е приложена за геомеханичното осигуряване на проекта и строителството на транспортния тунел KET2 – KET3 на рудник „Елаците“, при което са достигнати следните по-важни приложни резултати:

3.1. Проведени са комплексни лабораторни изследвания на образци от специално прокарани ядрови сондажи, пресичащи всички представени в района типове скали. При изпитванията са определени всички параметри, характеризиращи плътностните, якостните и деформационни свойства на литоложките разновидности, в условията на едномерно и обемно напрегнато състояние. Построени са пълните деформационни диаграми и са определени деформационните характеристики на скалите. Построени са паспортите на якост чрез критерия на Мор-Кулон, при едноосов и обемн натиск.

3.2. По данни от ядровите сондажи са определени RQD и характеристиките на структурната нарушеност на изграждащите скали. Допълнително са обработени резултатите от предхождащи конвенционални изследвания на напукаността, използвайки собствените изследвания като реперни, при което са определени структурните характеристики на целия масив, в обхвата на тунела.

3.3. Чрез приложението на двете класификационни системи RMR и Q е извършена оценка на геомеханичното „качество“ на масива и по неговата изменчивост той е разделен на четири специфични участъци. За определяне на задпределното поведение е определян и GSI, за всеки от участъците, чрез които са определени и параметрите на обобщения критерий на Хоек-Браун. Чрез софтуера на RocLab са определени взаимовръзките между двата посочени критерия с отчитане съвместното влияние на лабораторните и структурните свойства на скалите.

3.4. Извършени са комплексни изследвания за определянето на напрегнатото състояние на вместващия масив, чрез диагностични,

експертно-аналитични и *in situ* методи, при което за първи път са определени генотипа, разпределението и магнитудите и ориентация на компонентите на напрежения, в отделните участъци и общо за находище „Елаците“.

3.5. Съставена е многомерна база данни за пълна геомеханична характеристика на масива в проблемната зона, съдържаща всички необходими за инженерните разчети и параметричните изследвания входящи характеристики.

3.6. Съставен е геомеханичен модел на системата Вместващ масив/ Транспортен тунел и са избрани методите за числено моделиране чрез софтуерите RocLab, Phase2 8.0 и SLIDE 6.0 са извършени параметрични изследвания на НДС на системата ВМ/ТТ, нейната устойчивост и реакцията на масива от технологията и етапите на прокарване, определяне и оценени са рисковите геомеханични фактори, прогнозиран са вероятна механизми на загуба на устойчивост и разрушение и съответствието между дадените емпирични препоръки за прокарване и поддържане на тунела в устойчиво състояние. Определена е и устойчивостта на откоса при входния портал чрез два независими метода за оценка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение е необходимо да дадем следната информация. Дисертационният труд отразява комплексно извършените изследвания. Етапите и изпълнението на целите и задачите на разработената част от тези изследвания по вид, ниво на развитие и иновативност са първи не само за рудник „Елаците“, но и за страната. Такива, например са лабораторните изследвания на свойствата в обемно напрегнато състояние, пълната характеристика на масива, параметричните, числени изследвания и *in situ* измерването на напреженията в масива.

Изпитваме приятното задължение да изразим своята благодарност към висшия мениджмънт на Елаците-мед АД, дружествата Хеликс, Геострой и отделни колеги, за оказаното ни съдействие в процеса на рудничните изследвания и предоставената ни изходяща информация.

В резултат от изпълнението на етапите и видовете изследвания са публикувани следните статии:

1. Vutov V., V. Ivanov. Geomechanical Logistics of the construction of a transport tunnel at the "Elatsite" Mine, Bulgaria. I Symp.TIORIR'11, 2011, Zlatibor, Serbia.

2. Вутов Вл. Екологични аспекти при строителството на транспортен тунел КЕТ2/КЕТ3 на рудник „Елаците“. Годишник на МГУ, т.54, св.II, 2011.

3. Вутов Вл., В. Иванов. Диагностика на НДС на масива в района на транспортен тунел КЕТ2-КЕТ3 на рудник „Елаците“. Годишник на МГУ, т.55, св.II, 2012.

4. VUTOV V., IVANOV.V. METHODOLOGY FOR GEOMECHANICAL LOGISTICS OF DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TRANSPORT TUNNEL AT "ELATZITE COOPER" MINE, BULGARIA. 5th BALKAN MINING CONGRESS, Macedonia, Ohrid, 2013.

5. Вутов Вл., В. Иванов. Геомеханична характеристика на скалите и вместващия масив, в района на транспортния тунел на рудник „Елаците“. „Минно дело и геология“, 2014/7-8