УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ

бул. „Хр. Смирненски“ № 1, София 1046, Р България
тел.: (02) 865-68-63; +359 886 60 24 55
e-mail: *aceadm@uacg.bg; https://uacg.bg*

УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ, СОФИЯ

ХИДРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

АВТОРЕФЕРАТ

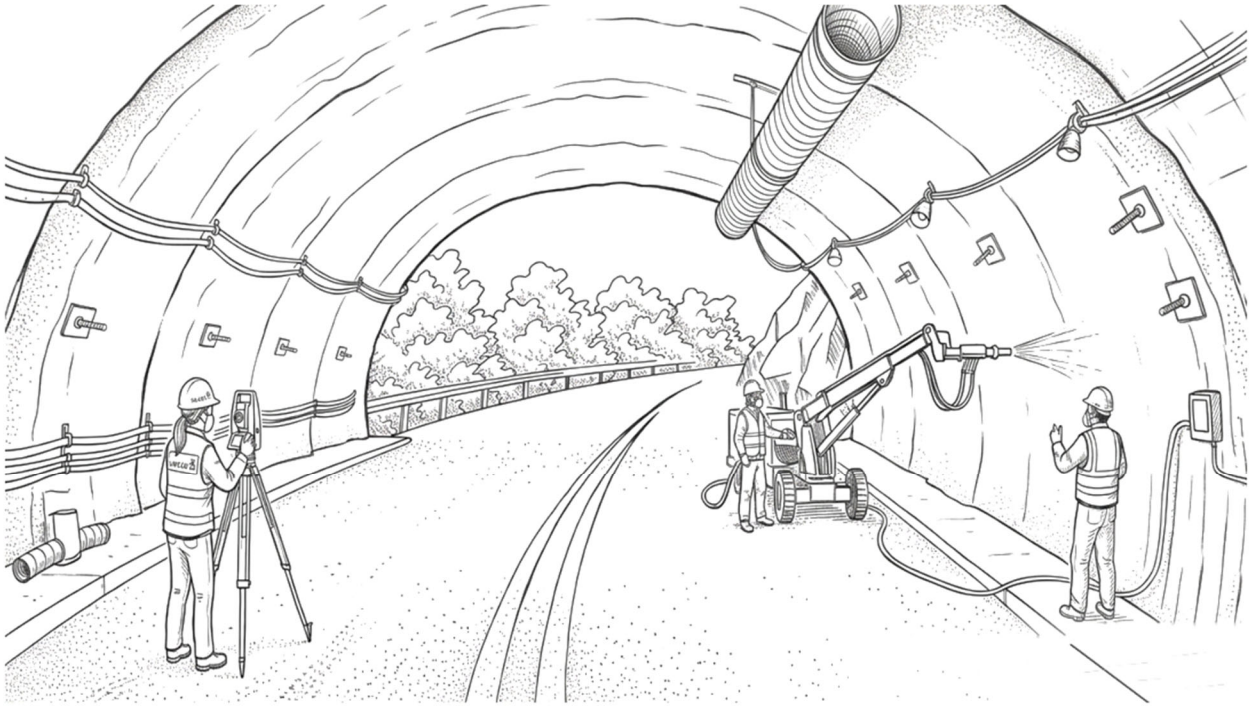
**НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПРИДОБИВАНЕ
НА ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА СТЕПЕН „ДОКТОР“
НА ТЕМА**

ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ И ТЯХНОТО ПОВЕДЕНИЕ ПРИ СЕИЗМИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

НАУЧНА СПЕЦИАЛНОСТ: ХИДРОТЕХНИЧЕСКО СТРОИТЕЛСТВО

ПРОФЕСИОНАЛНО НАПРАВЛЕНИЕ: 5.7. „АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ“

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ: ДОЦ. Д-Р ИНЖ. ВИКТОР ТАШЕВ,
КАТЕДРА „ХИДРОТЕХНИКА И ХИДРОМЕЛИОРАЦИИ“, УАСГ, ГР. СОФИЯ



АВТОР НА ДИСЕРТАЦИЯТА: ИНЖ. МАРТИН БОЙКОВ ПЕТКОВ

СОФИЯ 2026

УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ

бул. „Хр. Смирненски“ № 1, София 1046, Р България
тел.: (02) 865-68-63; +359 886 60 24 55
e-mail: *aceadm@uacg.bg; https://uacg.bg*

АВТОРЕФЕРАТ
НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПРИДОБИВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА СТЕПЕН „ДОКТОР“ НА ТЕМА

ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ И ТЯХНОТО ПОВЕДЕНИЕ ПРИ СЕИЗМИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

НАУЧНА СПЕЦИАЛНОСТ: ХИДРОТЕХНИЧЕСКО СТРОИТЕЛСТВО
ПРОФЕСИОНАЛНО НАПРАВЛЕНИЕ: 5.7. „АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ“
НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ: ДОЦ. Д-Р ИНЖ. ВИКТОР ТАШЕВ,
КАТЕДРА „ХИДРОТЕХНИКА И ХИДРОМЕЛИОРАЦИИ“, УАСГ, ГР. СОФИЯ

АВТОР НА ДИСЕРТАЦИЯТА: МАГ. ИНЖ. МАРТИН ПЕТКОВ

Ключови думи: *тунелна облицовка, здрави скални масиви, пръскан бетон с фибри, дисперсно армирани тунелни облицовки, скална механика, обсервационен метод, теория на прилагане на конструктивни фибри, тунел, остатъчна якост на дисперсно армиран бетон, емпирични уравнения, носеща способност, Еврокод 2, остатъчна якост, уравнение за носеща способност на огъване, сеизмичност, сеизмично проектиране тунел, стави в облицовката.*

Дисертацията е с обем 350 страници, в които са представени Увод и 12 отделни раздела. В дисертацията са поместени 199 броя фигури, 51 броя таблици и 295 броя уравнения и зависимости. При разработването на дисертацията са използвани 97 броя литературни източници и всички приложими действащи норми и стандарти в Република България.

Докторантът е зачислен в редовна форма на обучение към УАСГ на 01.03.2021 год. със Заповед на Ректора на УАСГ №168 от 01.03.2021 год. с решение на факултетен съвет Хидротехнически факултет - Протокол №9 от 26.02.2021 год.

Докторантът е отчислен с право на защита след изпълнение на индивидуалния план на 13.03.2025 год. с решение на катедра „Хидротехника и Хидромелиорации“, след провеждането на научен семинар и представяне от страна на Докторанта на изпълнените задачи, съгласно индивидуалният план, Протокол №12/08.04-11.04.2025 г. от решение на ФС и Заповед на Ректора на УАСГ №314 от 24.04.2025 г.

На 02.05.2026 год. Докторантът е представил подготвения дисертационен труд на научния си ръководител. След преглед от страна на научния ръководител е представен доклад на дата 08.05.2026 год.

Дисертационният труд е представен за обсъждане на разширено заседание на катедра „Хидротехника и Хидромелиорации“ към Хидротехнически Факултет, УАСГ, гр. София на дата 10.06.2026 год., за което е съставен Протокол №9 от дата 10.06.2026 г. със заключението, че представеният дисертационен труд има готовност за защита и с предложение към Факултетният съвет на Хидротехническият факултет да бъде открита процедура по защита и определяне на научно жури.

Първо заседание на комисията по публична защита на Дисертационният труд е насрочено за

.....2026 г. в УАСГ, гр. София, в зала ..... от ..... часа.

Материалите по процедурата за защита са предоставени съгласно вътрешните правила на университета и са на разположение на заинтересованите лица в кабинет 416, корпус А, УАСГ, гр. София, както и са качени на страницата на университета https://my.uacg.bg/page/publicna-zashhita.

УВОД

Развитието на съвременната хидротехническа, транспортна и друга инженерна инфраструктура е неразривно свързано с проектирането и изграждането на подземни съоръжения, сред които тунелите заемат особено важно място. Нарастващите изисквания към надеждността, безопасността и дълготрайността на конструкциите, както и нуждата от оптимизиране на строителните технологии, налагат усъвършенстване на проектните подходи и строителните практики при изпълнението на тунелни съоръжения. Този аспект определя, че тунелната облицовка има определяща роля за осигуряване на устойчивостта на изкопа, ограничаване на деформациите на околния скален масив и гарантиране на експлоатационната годност на съоръжението през целия му експлоатационен период.

Практиката показа, че при съвременното тунелно строителство вече не е достатъчно облицовката да се разглежда единствено като пасивен конструктивен елемент, предназначен да „поеме натиска“ от околния масив. Напротив, поведението на тунелната облицовка трябва да се оценява като част от общата система „скален масив - първична облицовка - вторична облицовка“, при която носимоспособността, деформативността и експлоатационната годност се формират в резултат от съвместната работа на отделните компоненти. Поради това обстоятелство все по-широко приложение намират тунелните облицовки от пръскан бетон с дисперсна армировка (фибри/ влакна). Причините за това обстоятелство не са само технологични. Безспорно е обстоятелството че, пръсканият бетон позволява бързо и гъвкаво изпълнение, добро прилепване/ адхезия към контура на изкопа и ефективна работа още в ранните етапи след изкопаването. По-съществения въпрос (и най-значимо предимство) обаче е, че при влагане на структурни/ конструктивни фибри материалът променя поведението си след образуване на пукнатина/и. Именно това е и инженерното предимство на дисперсната армировка (с фибри) - не толкова в повишаване на натисковата якост, колкото в осигуряване на остатъчна носеща способност, ограничаване развитието на пукнатините и поддържане на по-дуктилна работа на облицовката.

Разглежданият аспект заема централно място в дисертационния труд, включително във връзка с нуждата от формулиране на зависимости за определяне на носещата способност на чисто огъване на дисперсно армирани сечения. Теоретичната основа при дисперсно армираните тунелни облицовки се различава съществено от тази при класическите стоманобетонни конструкции. Следователно при дисперсно армираните облицовки проектният модел трябва да отчита не само момента на първо напукване, но и след пукнатинното поведение, енергията на разрушаване и остатъчната носеща способност на материала.

От проектантска гледна точка темата е особено актуална, защото приложението на дисперсно армиран пръскан бетон в тунелите изпреварва в известна степен нивото на нормативно и методическо изясняване на методите за проектиране. В практиката често се работи с комбинация от нормативни изисквания, емпирични зависимости, резултати от изпитвания и натрупан инженерен опит. Това само по себе си не е недостатък, но създава риск от неоднозначни проектни решения, особено когато трябва да се оцени реалната работа на облицовката в напукано състояние, да се направи проверка за крайно гранично състояние (ULS) или да се прецени доколко остатъчната якост може да бъде надеждно включена в оразмеряването. Поради това в дисертацията е отделено самостоятелно място на методите за изчисление, на проблемите в оразмерителните проверки и на нерешените въпроси при дисперсните армировки.

Внимание е обърнато и на тунелните облицовки в здрави скални масиви. Това е и причината в дисертацията да се разглеждат едновременно нормативните изисквания, емпиричният анализ, числено моделиране, блоковият анализ и определянето на гранични стойности на преместванията при ново проектно решение за дисперсно армирана облицовка.

Съществена част от разглеждания проблем в дисертацията е правилният избор на проектен подход. В представения труд този въпрос е развит последователно, като е отчетено, че директното прилагане само на класификационни системи от типа RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski) не винаги води до най-надеждното и/или икономически обосновано решение, а проектът следва да се валидира и коригира чрез мониторинг и анализ на реално измерените деформации.

Другата група въпроси разгледани в дисертацията, които придават актуалност на настоящото изследване, е свързана със сеизмичното поведение на подземните конструкции. В дисертацията е застъпено становището, че основният въпрос не се свежда до това дали тунелът проявява

разрушаване по механизъм, аналогичен на този при надземните конструкции, а до това дали след сеизмично въздействие съхранява своята носимоспособност, целостта на облицовката и експлоатационната си годност. Поради това се откроява и значението на дисперсната армировка, тъй като ако при статично натоварване тя се разглежда основно като средство за подобряване на след пукнатинното поведение, то при сеизмично въздействие нейната роля е още по-съществена, тъй като способността на облицовката да работи след локално напукване, без рязка загуба на носеща способност, и е пряко свързана с нейната устойчивост и с капацитета да поеме допълнителни деформации.

Поради горните обстоятелства основната насоченост на настоящата дисертационна работа е да се изяснят особеностите в работата на дисперсно армираните тунелни облицовки, да се оцени влиянието на остатъчната якост върху носещата им способност и да се анализира поведението им при сеизмично въздействие.

Изследването е насочено не само към преглед и систематизиране на съществуващите постановки, но и към търсене на практически приложим инженерен подход, който да свърже експерименталните характеристики на материала, проектните (оразмерителни) проверки и реалната работа на конструкцията в условията на тунелното строителство. В този смисъл дисертационният труд има едновременно научен и приложен характер.

Научната стойност на дисертацията е в стремежа да се обединят в обща рамка няколко групи въпроси, които в практиката често се разглеждат отделно, а именно: поведението на дисперсно армирана тунелна облицовка (пръскан бетон с фибри), оразмеряването на дисперсно армирани сечения, работата на дисперсно армирана облицовка в здрав скален масив, приложението на обсервационния метод и оценката на конструкцията при сеизмично въздействие. Настоящата дисертация е разработена именно с убеждението, че при тунелните конструкции доброто инженерно решение не е резултат само от теорията, или само от практиката, а от тяхното последователно съчетаване.

Когато става дума за дисперсно армирани тунелни облицовки, това означава да се работи едновременно с материала, с конструктивния модел, с геоложката среда и с действителното поведение на обекта. Само по този начин може да се даде надежден отговор на въпроса доколко тези облицовки са ефективно и безопасно решение не само при обичайните натоварвания, но и при сеизмично въздействие.

Една от най-съществените научно-приложни ориентирани части на настоящата дисертация е свързана с изпълнението, наблюдението и анализа на пробен (опитен) участък в реален железопътен тунел, при който е приложен обсервационният метод по БДС EN 1997, в съчетание с дисперсно армирана първична облицовка. Пробният участък е реализиран в две тунелни тръби (на два забоя), което само по себе си показва значителния организационен, измервателен и аналитичен обхват на проведената работа. Самото изпълнение на пробния участък е съпроводено и с оперативно инженерно управление. Това е характерно за правилното приложение на обсервационен метод - проектът не се разглежда като предварително определена схема неподлежаща на промени, а като контролирана система с обратна връзка между наблюдение, анализ и инженерна намеса.

Също така като научно-приложна работа е представен и проектен случай с подземна железопътна гара в град Гьотеборг, Швеция, където е приложено решение за здраво скални масиви, съставено по алтернативен метод с отчитането, че основния носещ елемент е скалният масив, който е дисперсно армиран пръскан бетон (крепеж) и укрепен с анкери. Към етапа на предаване на дисертацията проектът е изпълнен, като са напълно валидирани направените приемания, представените решения/ анализи и са потвърдени очакваните резултати (деформационно поведение).

От научно-приложна гледна точка постигнатите резултати са важни за постигане на целите на дисертационният труд. Анализът на наблюденията показва, че при приложените решения (при слабо и/или при здраво скален масив) крепежната конструкция запазва своята носеща способност и експлоатационна годност, без образуване на пластични стави (при статично натоварване), без навлизане в профила на бъдеща вторична облицовка и без съществено конструктивно влошаване в изпълнените пробни участъци.

Дисертационният материал е структуриран в отделни раздели като съзнателно избран подход на изложение, чрез който се осигурява вътрешна логика, проследимост и ясно разграничаване между

литературни и нормативни постановки, авторски разработки, интерпретации и инженерни обобщения.



СЪДЪРЖАНИЕ

УВОД ... 3
1. АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА ... 8
2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО ... 8
3. ОБЕКТ И ПРЕДМЕТ ... 9
4. РАБОТНИ ХИПОТЕЗИ ... 9
5. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ ... 10
6. РАЗДЕЛ 1: ВЪВЕДЕНИЕ ... 10
7. РАЗДЕЛ 2: ОБЗОР НА ЛИТЕРАТУРНИТЕ ИЗТОЧНИЦИ. КРИТИЧЕН АНАЛИЗ И ИЗВОДИ ... 11
8. РАЗДЕЛ 3: ТЕОРИИ ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ ОТ ПРЪСКАН БЕТОН ... 12
9. РАЗДЕЛ 4: ЕМПИРИЧНИ УРАВНЕНИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОСТАТЪЧНАТА ЯКОСТ НА БЕТОН АРМИРАН С ФИБРИ СЪГЛАСНО СТАНДАРТ БДС EN 14651, ОСНОВАНИ НА СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ЕСКПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ ... 13
9.1. ЦЕЛИ НА СЪСТАВЕНИТЕ УРАВНЕНИЯ ... 14
9.2. ИЗВЕЖДАНЕ НА СТАТИСТИЧЕСКА ЗАВИСИМОСТ ... 16
9.3. ОБОБЩЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ... 18
9.4. ПОСТИГНАТИ РЕЗУЛТАТИ И НАСОКИ ЗА БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ ... 19
10. РАЗДЕЛ 5: УРАВНЕНИЕ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НОСЕЩА СПОСОБНОСТ НА СЕЧЕНИЕ ПОДЛОЖЕНО НА ОГЪВАНЕ, В КРАЙНО ГРАНИЧНО СЪСТОЯНИЕ (ULS), НА ДИСПЕРСНО АРМИРАНА ТУНЕЛНА ОБЛИЦОВКА, СЪГЛАСНО ТЕОРЕТИЧНИТЕ ПОСТАНОВКИ НА ЕВРОКОД 2 ... 19
10.1. СТАТИСТИЧЕСКА ОБРАБОТКА ... 22
10.2. УРАВНЕНИЕ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НОСЕЩА СПОСОБНОСТ НА ОГЪВАНЕ ... 23
10.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 23
11. РАЗДЕЛ 6: ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ПРОБЕН УЧАСТЪК ПО ОБСЕРВАЦИОНЕН МЕТОД С ДИСПЕРСНО АРМИРАНА ОБЛИЦОВКА ... 23
12. РАЗДЕЛ 7: ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ В ЗДРАВИ СКАЛНИ МАСИВИ. МЕТОДИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ ... 31
13. РАЗДЕЛ 8: СЕИЗМИЧНО ПОВЕДЕНИЕ НА ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ ... 42
14. РАЗДЕЛ 9. ОТЧЕТ ЗА ИЗВЪРШЕНИТЕ ДЕЙНОСТИ В ПЕРИОДА НА ОБУЧЕНИЕ ... 46
14.1. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ... 46
14.2. НАУЧНО ПРИЛОЖНА ДЕЙНОСТ ... 47
14.3. СТАТУС НА ЦИТИРАНИЯТА ... 47
15. РАЗДЕЛ 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 47
16. РАЗДЕЛ 11. ЗАЯВЕНИ ПРИНОСИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА 49
16.1. НАУЧНИ ПРИНОСИ ... 49
16.2. НАУЧНО - ПРИЛОЖНИТЕ ПРИНОСИ ... 49

16.3. АВТОРСКО ЗАЯВЛЕНИЕ ЗА САМОСТОЯТЕЛНОСТ И ДОБРОСЪВЕСТНОСТ 50
17. ЗАКЛЮЧИТЕЛНИ БЕЛЕЖКИ НА АВТОРА 50
18. РАЗДЕЛ 12. БИБЛИОГРАФИЯ 52
18.1. НАУЧНА ЛИТЕРАТУРА 52
18.2. НОРМАТИВНИ ДОКУМЕНТИ, СТАНДАРТИ И РЪКОВОДСТВА 55

СПИСЪК НА ФИГУРИТЕ

Фиг. 1. Поведение при опън и огъване на дисперсно армиран бетон [4.2]. 13
Фиг. 2. Схема за изпитване на образец съгласно EN 14651 [4.3] 14
Фиг. 3. Обзор на използваните данни 16
Фиг. 4. Python код (script) за определяне регресионните коефициенти 18
Фиг. 5. Ефекти от дисперсната армировка върху носещата способност 20
Фиг. 6. Обобщение по брой стойности по параметри 21
Фиг. 7. Носеща способност на сечение на огъване 21
Фиг. 8. Разпределение на носеща способност на сечение на огъване 21
Фиг. 9. Разпределение на носеща способност на сечение на огъване 21
Фиг. 10. Настъпили повреди по крепежната конструкция, разкрити при репрофилиране Път 1, участък при 33+300. 24
Фиг. 11. Крепеж за опитен участък 25
Фиг. 12. Мерителен Профил, при обсервационен метод 26
Фиг. 13. Схема на обединяване на двата свода на обрушване 28
Фиг. 14. Схема на при прилагане на крепеж осигуряващ недопускане на сливането на двата свода на обрушване 28
Фиг. 15. Емпирична диаграма за скален крепеж с интервали според очакваните скални условия [7.4] 32
Фиг. 16. Модели на разрушаване на пръскан бетон [7.7] 33
Фиг. 17. Скален клин образуващ се между скалните анкери, част от системният анкерен крепеж, натоварващ дисперсно армираният пръскан бетон 33
Фиг. 18. Нарушаване на адхезията в пръскания бетон, поради разхлабен скален блок с ъгъл 30 градуса, при добри условия на сцепление. 34
Фиг. 19. Нарушаване на адхезията в пръскания бетон, поради разхлабен скален блок с ъгъл 45 градуса, при добри условия на сцепление. 34
Фиг. 20. Необходима дебелина за предотвратяване на повреда от огъване, при лоша адхезия (0 MPa) 35
Фиг. 21. Характеристична стойност на максималния огъващ момент, при лоша адхезия 35
Фиг. 21. Необходима дебелина за предотвратяване на продънване от пирамидален блок между скалните анкери, при добра адхезия 36
Фиг. 22. Натоварване върху анкерната плоча 36
Фиг. 23. Необходима дебелина за предотвратяване на продънване при планките на скалните анкери, при лоша адхезия 36
Фиг. 24. Ситуационно разположение на разглежданите сечения 38
Фиг. 25. Резултати от анализ за сечение А-А. Вертикални премествания в скалния масив при гравитационно напрегнато състояние 38
Фиг. 26. Резултати от анализ за сечение А-А. Вертикални премествания в скалния масив при хоризонтално напрегнато състояние 39
Фиг. 26. Резултати от блоков анализ за пълен профил, без колони. 40
Фиг. 27. Точки за наблюдение, по тунелният профил 40
Фиг. 28. Мрежа от крайни елементи около тунела (модел МКЕ) 42
Фиг. 29. Последователност на образуване на пластични стави във вторичната облицовка . 43
Фиг. 30. Гранични условия в скалния масив 43

1. АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Темата на настоящия дисертационен труд е свързана с един базов и актуален проблем в областта на тунелното строителство, а именно поведението на дисперсно армираните тунелни облицовки, изпълнявани основно от пръскан бетон, армирани със структурни фибри, при статични и сеизмични въздействия. Актуалността на изследването се определя както от нарастващото приложение на дисперсно армиран пръскан в съвременната тунелна практика, така и от наличието на редица все още ненапълно изяснени въпроси, свързани с ефективното определяне на остатъчната якост, оценката на носещата способност при огъване, поведението след напукване и границите на приложимост на класическите нормативни подходи.

В тунелната практиката дисперсно армираните облицовки все по-често се разглеждат не само като технологично удобна, но и като конструктивно ефективна система. Въпреки това тяхното оразмеряване и оценка на работата им често се основават на подходи, разработени за класически стоманобетон, без в достатъчна степен да се отчита спецификата на дисперсно армирания материал и неговото следпукнатинно поведение. Това създава необходимостта от по-задълбочено научно и приложно изследване, насочено към разработване на адекватен методически апарат за оценка и проектиране на подобен тип тунелни облицовки.

Актуалността на темата се засилва и от необходимостта да бъде изследвано поведението на тунелните облицовки при сеизмично въздействие. Макар подземните съоръжения традиционно да се приемат като по-слабо уязвими, спрямо надземните конструкции, при сложни инженерно-геоложки условия, при наличие на тектонски нарушения, зони с променлива коравина и отслабени участъци, въздействието на земетръс може да доведе до значителни деформации, локални увреждания и влошаване на експлоатационната годност. Именно поради това изследването на дисперсно армирани тунелни облицовки в контекста на реалната геоложка среда и на сеизмичната чувствителност има не само научна, но и пряка инженерна и обществена значимост.

Настоящият труд е актуален и поради факта, че не се ограничава до теоретичен преглед, а търси връзката между научната постановка и практическата приложимост. Това е особено важно при тунелното строителство, където надеждното проектно решение не може да бъде изведено единствено от предварителни допускания, а следва да бъде свързано с наблюдение, контрол на деформациите, обратен анализ и възможност за проектна адаптация в хода на строителството.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Основната цел на дисертационния труд е да се изследва поведението на дисперсно армираните тунелни облицовки и на тази основа да се разработи и обоснове надежден подход за тяхното оразмеряване, конструктивно оформяне и приложение в реални инженерно-геоложки условия, включително при сеизмично въздействие. В по-широк смисъл стремежът беше да се предложи такава методическа рамка, която едновременно да отчита спецификата на дисперсно армирания материал, особеностите на тунелната конструктивна система и изискването от инженерна приложимост в условията на реалното строителство.

За постигане на тази цел беше необходимо първо да се извърши задълбочен анализ на съществуващите теоретични и нормативни предпоставки, както и проектни подходи, свързани с дисперсно армирания бетон и неговото приложение при тунелни облицовки. Това включваше изясняване на ролята на остатъчната якост на опън при огъване, на следпукнатинната носимоспособност и на поведението на материала при огъване, както и оценка на ограниченията на класическите подходи, базирани на теорията на стоманобетона.

Последваща задача беше разработването на аналитични зависимости и уравнения за определяне на остатъчната якост и на носещата способност при огъване на дисперсно армирани сечения. Именно тази част от изследването беше насочена към създаване на по-адекватен и ефективен инструмент за конструктивно оразмеряване, който да отчита действителната работа на материала след напукване и да бъде приложим към тунелни облицовки от пръскан бетон с фибри.

Паралелно с това беше необходимо да се изследва и взаимодействието между облицовката и скалния масив, както и приложимостта на различни инженерно-геоложки системи за оценка на

условията. В тази връзка специално внимание беше отделено на ограниченията (в приложението) на класификационната система RMR при сложна и променлива геоложка среда, както и на ролята на обсервационния метод като по-гъвкав и надежден подход при проектиране и изпълнение на тунели.

Като заключително направление на развитие на дисертацията беше поставена задачата да се провери приложимостта на разработените постановки в реални условия чрез проектен анализ, полеви наблюдения, мониторинг на деформациите и приложение на обсервационния метод в пробен участък. Именно чрез тази последователност от задачи се достигна до извод, че поставената цел е постигната, а предложените методики са намерили своята реална приложимост.

3. ОБЕКТ И ПРЕДМЕТ

Обект на изследването в дисертационния труд са тунелните облицовки от бетон с дисперсна армировка, разглеждани като конструктивен елемент в системата „скален масив - крепеж - облицовка“. Изследването е фокусирано върху облицовки, изпълнявани като първична носеща конструкция или като конструктивно значим елемент (вторична облицовка) при изграждането на подземни съоръжения в различни инженерно-геоложки условия.

Предмет на изследването е механичното, конструктивното и експлоатационното поведение на тези облицовки. В рамките на дисертационния труд това поведение е анализирано чрез остатъчната якост на дисперсно армирания бетон, носещата способност при огъване, работата на облицовката след напукване, потенциала за допускане на пластични стави, взаимодействието с околния скален масив, ролята на инженерно-геоложките условия, приложението на обсервационния метод и особеностите на поведението при сеизмично въздействие.

4. РАБОТНИ ХИПОТЕЗИ

Първата работна хипотеза е свързана с условието пластичните стави в тунелната облицовка да се разглеждат не непременно като недопустимо състояние, а като допустим и конструктивно обоснован механизъм на работа, когато са отчетени в проектния модел и са осигурени чрез подходящо конструктивно решение. Проведеният анализ и резултатите от приложението на предложената методика показаха, че такова допускане е възможно и инженерно оправдано, при условие че са осигурени необходимите изисквания за носеща способност, деформационна устойчивост и експлоатационна годност.

Втората работна хипотеза е, че системата за класифицирана по RMR (Bieniawski) не е подходяща за самостоятелно прилагане скала, когато се използва като единствена основа за оценка и избор на проектно решение в сложна, променлива и тектонски нарушена геоложка среда, каквато се наблюдава при изпълнението на повечето тунели в България. Извършеният анализ потвърди тази постановка. Установи се, че при подобни условия формалното използване на RMR не е достатъчно, тъй като не отразява в необходимата степен динамиката на геоложката обстановка, времевия фактор, локалните особености на масива и нуждата от адаптивно проектно поведение.

Третата основна хипотеза е, че оразмеряването на дисперсно армирани тунелни облицовки не следва да се извършва чрез директно прилагане на класическите постановки на Еврокод 2, а чрез специален метод, отчитащ остатъчната якост, следпукнатинното поведение на материала и реалната схема на работа на конструкцията. Резултатите от изследването потвърдиха и тази хипотеза, тъй като показаха, че прякото пренасяне на общите правила за класически стоманобетон не е достатъчно надеждно за дисперсно армираните облицовки и че е необходим по-специализиран аналитичен подход.

5. МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследването е проведено чрез комплексен методически подход, който съчетава теоретични, аналитични, статистически и приложни методи.

Наред с това бяха използвани аналитични и инженерни подходи за оценка на остатъчната якост и за извеждане на уравнения за носещата способност при огъване. В тази част от изследването съществено място зае статистическата обработка и обобщаване на експериментални данни, чрез които беше възможно да се формулират зависимости с практическа приложимост при оразмеряване.

Значим дял в работата имаше и проектният анализ, свързан с прилагането на разработените постановки в реална инженерна среда. В тази връзка беше използван обсервационният метод (по БДС EN 1997) като основен инструмент за съчетаване на предварителното проектиране с текущо наблюдение, контрол на деформациите, определяне на алармени нива и възможност за последваща проектна корекция. Особено важни за изследването бяха натурните наблюдения, геодезическият мониторинг и анализът на реално измерени деформации, чрез които се проследи действителното поведение на облицовката в пробен/ опитен участък.

Използването на този комплекс от методи позволи изследването да бъде изградено не само на теоретично, но и на реално приложно ниво. Именно тази комбинация между научен анализ, аналитична разработка и практическа проверка даде възможност да бъдат получени резултати с висока степен на надеждност.

Следва представяне на отделните раздели на дисертационният труд.

6. РАЗДЕЛ 1: ВЪВЕДЕНИЕ

Като първо подземно съоръжение, за което има исторически данни се счита Bomvu Hill, Swaziland, изпълнено от неандерталци и считано към настоящият момент за най-старата мина в света. С развитието на човешката цивилизация необходимостта от използването на тунелни съоръжения се формира преди повече от 4000 години, 2200 г. пр. н.е., за преминаване под река Ефрат и свързващ двете части (вероятно Двореца и Вавилонската Кула) на древен Вавилон, в Месопотамия. С развитието на тунелните съоръжения, техните геометрични размери се увеличават значително и те стават част от критичната инфраструктура на всяка една държава. Това поставя и високи изисквания към тяхната поддръжка, устойчивост и експлоатационна годност. Освен това постоянно се оптимизират методите за изпълнение, материалите за носещите конструктивни елементи (тунелните облицовки) и прилагането на екологично устойчиви решения - например за редуциране на количеството на стомана, която има най-голям негативен ефект/ въглероден отпечатък. Не по-малко интересен е въпросът свързан с разбирането на поведението на тунелните конструкции (облицовки) под статични и динамични въздействия.

Предвид обстоятелството, че тунелните и подземните съоръжения по своята същност са високоотговорни/ високорискови инженерни обекти, тяхното проектиране следва да се основава на ясно дефинирана нормативна рамка, каквато би могла да бъде например Европейската система от конструктивни Еврокодове или друга аналогична нормативна система. Към настоящия етап обаче системата от конструктивни Еврокодове не се препоръчва за проектиране на тунелни съоръжения, както и на язовирни стени, атомни електроцентрали и други съоръжения със специални изисквания по отношение на надеждността и безопасността. Този извод остава в сила и по отношение на оразмерителните процедури за дисперсно армиран пръскан бетон.

Необходимо е да се направи и уточнение относно позоваване в дисертацията на системата от конструктивни Еврокодове при определяне на отделни изчислителни параметри и при формулиране на част от оразмерителните постановки. Поради това в настоящото изследване системата от конструктивни еврокодове не се възприема като достатъчна и завършена методика за оразмеряване на тунелни облицовки, а като нормативна рамка, която по необходимост служи за основа при определянето на отделни параметри и при осигуряване на съответствие с изискванията на Възложителите и действащата проектантска практика. Именно липсата на специализирана и приложима нормативна база за този вид конструкции е една от основните причини за необходимостта от настоящото изследване.

Дисертационен труд е насочен основно към изследване на дисперсно армирани тунелни облицовки от пръскан бетон при подземни транспортни съоръжения, хидротехнически, пътни и железопътни тунели, при които взаимодействието между облицовката и скалния масив, и въздействието на експлоатационни и извънредни натоварвания имат определящо значение за конструктивното решение. В този смисъл разработените в дисертацията подходи са приложими и към всички хидротехнически тунели (безнапорни и напорни), подземни изработки с големи отвори и сложна пространствена работа, каквито са каверните на ВЕЦ и ПАВЕЦ, както и към подземни гари, камери, шахти, вертикални и наклонени подземни напорни тръбопроводи (щолени) и други инженерни обекти, при които облицовката работи съвместно със заобикалящия масив.

7. РАЗДЕЛ 2: ОБЗОР НА ЛИТЕРАТУРНИТЕ ИЗТОЧНИЦИ. КРИТИЧЕН АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

Основната цел на извършеният обзор на литературните източници е детайлно запознаване и идентифициране на липсващи разработки по темата на дисертацията.

При обзора са проучени литературните източници с цел: оценка на актуалността на темата на дисертацията; установяване на степента на нейната научна и практическа значимост; проследяване на новите и перспективните развития по темата; идентифициране на подходящи методи за нейното подробно изследване. В рамките на обзора са разгледани и някои все още дискусионни въпроси по темата на дисертацията с цел обосноваване на нейната значимост и актуалност.

В Раздел 2 е направено систематизирано въведение относно проектирането на дисперсно армираните тунелни облицовки, като е изяснена тяхната специфика спрямо класическите бетонни и стоманобетонни конструкции. Установено е, че пръсканият бетон със структурни (конструктивни) фибри следва да се разглежда като хетерогенен композитен материал. В раздела е извършена класификация на основните типове тунелни облицовки и са разгледани проектните постановки, свързани със степента на съвместна работа между първичната и вторичната облицовка, хидроизолационния слой и околния скален масив. Внимание е отделено на основния принцип при проектирането на тунелните облицовки, а именно съхраняване в максимална степен на носещата способност на скалния или земния масив, чрез развитие на естествен ефект на засводяване.

В раздела е анализирана и работната диаграма на неармирания и дисперсно армирания бетон, като е установено, че определящо значение за тунелните облицовки имат следпукнатинното им поведение, способността за поемане на енергия и дуктилността след напукване. Формулирани са и основните постановки при оразмеряването на дисперсно армирани тунелни облицовки, като е прието, че те следва да се базират на работни диаграми „напрежение - деформация“ за сечение подложено на огъване.

В заключителната част на раздела е разгледано и сеизмичното поведение на тунелните конструкции. На тази основа е мотивирана необходимостта дисперсно армираните тунелни облицовки да бъдат изследвани не само по отношение на статичната им носеща способност, но и с оглед на поведението им при извънредни въздействия, включително при сеизмични натоварвания, където значение имат остатъчната якост, намалената коравина и възможността за преразпределяне на вътрешните усилия без настъпване на крехко разрушаване.

В резултат от извършения преглед на литературните източници, включващи научни публикации, изследвания и приложни разработки, бяха идентифицирани области, в които е необходимо допълнително развитие на методологията за проектиране и практическо прилагане на дисперсно армирани тунелни облицовки. Също така на база на извършения анализ може да се заключи, че към настоящия момент все още не е напълно изяснен подходът за оразмеряване на подобен тип конструкции в съответствие със системата на конструктивните Еврокодове.

В тази връзка в следващите етапи на изследването е включено:

- статистическа обработка на наличните данни и проследяване на зависимостите между количеството фибри и носещата способност, определена по Еврокод;
- провеждане на експериментални изпитвания за проверка на идентифицираните зависимости;

- приложение на получения подход чрез приложение в реален тунелен проект.
- необходимостта разработените в дисертацията уравнения за определяне на физико - механични показатели (остатъчна якост на опън при огъване) и оразмерителна зависимост (носеща способност на огъване) да бъдат разгледани не само при статично натоварване, но и при сеизмично индуцирани деформации и усилия.

Извършеният в Раздел 2 преглед на литературните източници дефинира теоретичната и приложната рамка на изследването, като последователно анализира основните принципи при проектирането и анализа на подземни конструкции.

8. РАЗДЕЛ 3: ТЕОРИИ ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ ОТ ПРЪСКАН БЕТОН

Подземните конструкции се характеризират със сложно за прогнозиране поведение, спрямо въздействието от масива, поради наличието на фактори и неизвестни, които са извън нормалните възможности за проучване и сложната връзка на реакция земен масив-конструкция. Върху тунелните облицовки действат геотехнически, експлоатационни и особени въздействия. Основните въздействия са собственото тегло, скален/ земен (планински) натиск, хидростатичен натиск, натоварване вследствие на инжектиране, натоварване от конструкции вътре в тунела, експлоатационни товари, и извънредни като: пожар и инциденти (например дерайлиране на влак), както и особени товари - при сеизмичност. Тъй като всяко тунелно съоръжение е различно, то за него следва ясно и конкретно да бъдат идентифицирани въздействията.

Основният принцип при проектиране на тунелните облицовки е да бъде запазена носещата способност на масива, така че натоварването върху облицовката да бъде минимално. Чрез изпълнението на изкопа за направа на тунелната изработка се преразпределят хоризонталните и вертикалните напрежения в почвения масив, както и съответните тангенциални и радиални (главни) напрежения.

Тунелните облицовки от пръскан бетон с дисперсна армировка може да се изпълнят с отлични характеристики, осигуряващи дълготрайност на облицовката и характеристики/ параметри като на монолитен бетон и с експлоатационна годност спрямо определеният експлоатационен срок. Изборът на тип облицовка се основава на конкретните нужди на проекта, изискванията за дълготрайност, метод за изпълнение, метод на хидроизолиране и т.н.

В Раздел 3 е съставена теоретичната и приложната рамка на дисертацията, както и тази за анализ и оразмеряване на дисперсно армирани тунелни облицовки от пръскан бетон. Като основна теоретична предпоставка е използвана теорията на Грифит за развитието на пукнатини в крехки материали, чрез която е потвърдена основната роля на микродефектите, концентрацията на напрежения и енергията на разрушение при оценка на работата на бетонния композит след пукнатинообразуване. Систематизирани са основните методи за проектиране на тунели и тунелни облицовки в зависимост от инженерно-геоложките условия, размера на профила и изискванията към дълготрайността на облицовката.

При класическите бетонни и стоманобетонни конструкции изчислителният модел е изграден върху зависимостите „напрежение - деформация“, върху хипотезата за равнинните сечения и върху предварително зададеното положение на армировката. При дисперсно армирания бетон обаче теоретичната основа е различна спрямо класическия стоманобетон. Съществената разлика идва от това, че при дисперсната армировка граничното състояние не се определя само от достигане на определено напрежение, а от процеса на образуване, развитие и стабилизиране на пукнатините. Именно тук се прилага теорията на разрушението. Теоретичните предпоставки са заложени в теорията на Грифит за разпространение на пукнатини в крехки материали, какъвто е бетонът или циментовият композит. С тази теория надлежно се обяснява защо реалната якост на материала е значително по-ниска от теоретично възможната според междуатомните сили: причината е наличието на микродефекти и микропукнатини, около които възниква силна концентрация на напрежения. От гледна точка на механиката на разрушението това означава, че при бетона, а в още по-голяма степен при дисперсно армирания бетон, определящо значение има не само средното напрежение в

напречното сечение, но и поведението на единичната пукнатина, както и енергията, необходима за нейното разпространение.

Най-съществената разлика между стоманобетон и дисперсно армиран бетон може да се формулира като:

- класическата теория разглежда какво е напрежението в сечението и кога материалът достига пределната си якост (натиск/ опън);
- теорията на разрушението разглежда как възниква пукнатината, как се развива и каква е способността на материала да запази носеща работа след напукване.

Това разграничение е особено важно при тунелните облицовки от пръскан бетон с фибри (дисперсно армирани).

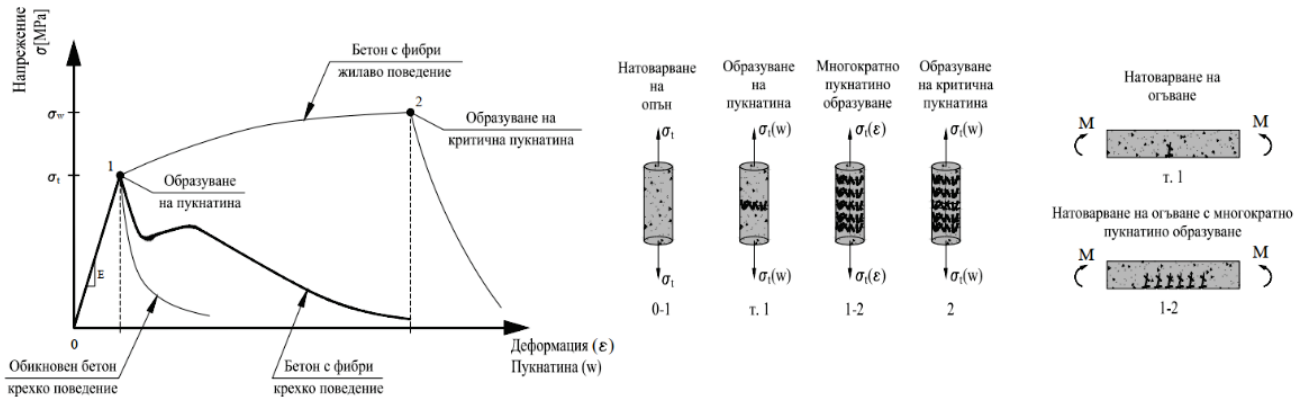
Практическият извод от проведеното проучване и анализ на теоретичните модели в дисертацията е, че в еластичния стадий дисперсно армираният бетон може да се разглежда в рамките на теорията на композитите и класическата механика на материалите.

9. РАЗДЕЛ 4: ЕМПИРИЧНИ УРАВНЕНИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОСТАТЪЧНАТА ЯКОСТ НА БЕТОН АРМИРАН С ФИБРИ СЪГЛАСНО СТАНДАРТ БДС EN 14651, ОСНОВАНИ НА СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ЕСКПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ

В етапа на проектиране на дисперсно армирани тунелни облицовки в слабо скални (и/или земни) почви, в практиката се появява неяснота какви параметри следва да се използват за дисперсно армираните бетони, поради липсата на: експериментални данни и конкретни резултати в този ранен етап. В Раздел 4 е представена проведената последователна изследователска и аналитична процедура, насочена към установяване на зависимостите между основните материални и технологични параметри на дисперсно армирания бетон и неговата остатъчна якост на опън при огъване. Процедурата започва с дефиниране на целта и обхвата на анализа, както и с терминологично уточняване на използваните якостни показатели, съобразно нормативната база и спецификата на бетона с фибри.

За дисперсно армирани бетони якостта на натиск е почти еднаква с якостта на натиск на обикновен бетон. Якостта на опън при огъване може да бъде определена от тестове съгласно методиките за обикновен бетон (БДС EN 206) или чрез зависимостите съгласно Еврокод 2 [4.1] до момента на образуване на първа пукнатина. Остатъчната якост на огъване, определена за етапа след образуване на пукнатина, следва да бъде определена на база резултати от изпитвания. За целта пробните тела от дисперсно армиран бетон се изпитват на огъване или опън. От проведеното изпитване се получават резултати за капацитета им на огъване - остатъчна якост:

- Изместване при отваряне на пукнатина (CMOD = Crack mouth opening displacement);
- Работни диаграми за зависимост огъване - деформация/пукнатини.



Фиг. 1. Поведение при опън и огъване на дисперсно армиран бетон [4.2].

При модела на нелинейната става, поведението на дисперсно армирана греда при огъване се идеализира чрез локализирана пукнатина в средата на отвора, като в напуканата зона преносът на усилия се осъществява именно чрез механизма на премостване от фибрите. Сечението може да бъде оразмерено чрез метод "σ-ε", основаван на зависимостите „натоварване - деформация“ или „натоварване - изместване“ при отваряне на пукнатина (CMOD).

Остатъчната якост ($f_{R,i}$) се определя чрез изпитване на образци на огъване, което може да се проведе чрез три или четири точков тест на пробни тела (с или без прорез). Размерът на пробните тела (греди) е 75 до 150 mm височина и широчина, и дължина от 550 до 750 mm. След получаване на резултатите от изпитването (сила - деформации - размер на отместването CMOD) се определя остатъчната якост. При изпитванията винаги следва да се отчита и т.н. мащабен ефект.

$$f_{R,i} = \frac{3.F_{R,i}.L}{2.b.h_{sp}^2} \quad (1)$$

Където:

$f_{R,i}$ е остатъчната якост на опън при огъване, съответстваща на $CMOD = CMOD_i$ или $\delta = \delta_i$ (i = 1,2,3,4), N/mm^2;

$F_{R,i}$ е натоварването, съответстващо на $CMOD = CMOD_i$ или $\delta = \delta_i$ (i = 1,2,3,4), N;

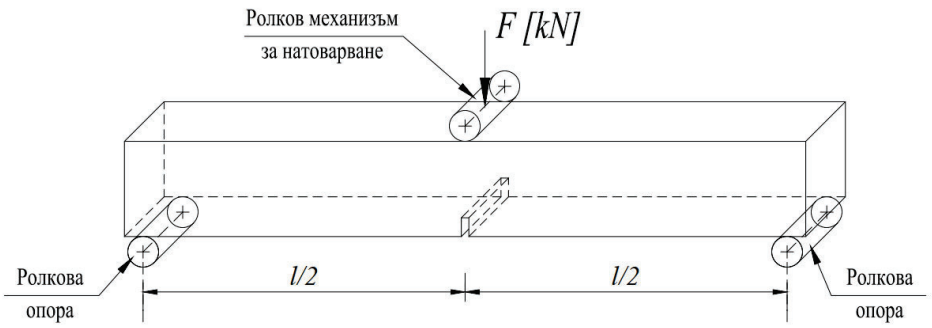
L е дължина на отвора, mm;

b е ширината на образеца, mm.

h_{sp} е разстоянието между върха на прореза и горната част на образеца, mm

Уравнение (1) служи за определяне на остатъчната якост на опън при огъване $f_{R,i}$ въз основа на измереното натоварване, отчетено при зададена стойност на отваряне на устието на пукнатината CMOD.

Европейският стандарт БДС EN 14651 определя метода за измерване на якостта на опън на оформени образци (с препоръчителни размери $h/b/l_{span} = 150/150/500\,mm$) за изпитване на огъване на бетонно сечение армирано с метални фибри.



Фиг. 2. Схема за изпитване на образец съгласно EN 14651 [4.3]

С използването на универсална машина за изпитване, оборудвана със специално устройство за триточково огъване съобразено с [4.3], се извършва определяне на стойностите на якостта при огъване чрез анализ на кривата "натоварване - изместване при отваряне на пукнатина" или кривата "натоварване - деформация.

9.1. ЦЕЛИ НА СЪСТАВЕНИТЕ УРАВНЕНИЯ

Към момента на изготвяне на дисертацията формирането на достатъчна по обем експериментална база (осигуряваща представителна статистическа извадка) за изпитване на бетон, армиран с фибри, е затруднено от редица организационни, времеви и ресурсни фактори. Като алтернатива на лабораторният метод за потвърждение на резултатите може да се приложи обсервационен метод, при който се отчита неопределеността чрез проверка на очакваното поведение от първоначалния проект по време на строителството. Следната последователност от дейности беше извършена, за целите на анализа и съставяне на уравнения за остатъчна якост:

- Набиране на експериментални данни от различни лабораторни изпитвания, с възможно най-широк набор от различни параметри за бетоните смеси и дисперсна армировка.
- Селектиране, сортиране и предварителна обработка на данните с цел отстраняване на нехарактерни стойности, значителни отклонения и несъответствия.
- Дефиниране на подходящ статистически и математически метод/ процедура за извеждане на уравненията според наличните входни данни.
- Преглед на първичните резултати и корекции на входните данни при необходимост.
- Оценка и Калибриране на резултатите.

За целите на събиране на данни за съставяне на уравненията бяха отправени запитвания към производители и доставчици на структурни макро фибри, а също бе направен преглед на налични данни от лабораторни изпитвания на образци съгласно [4.3].

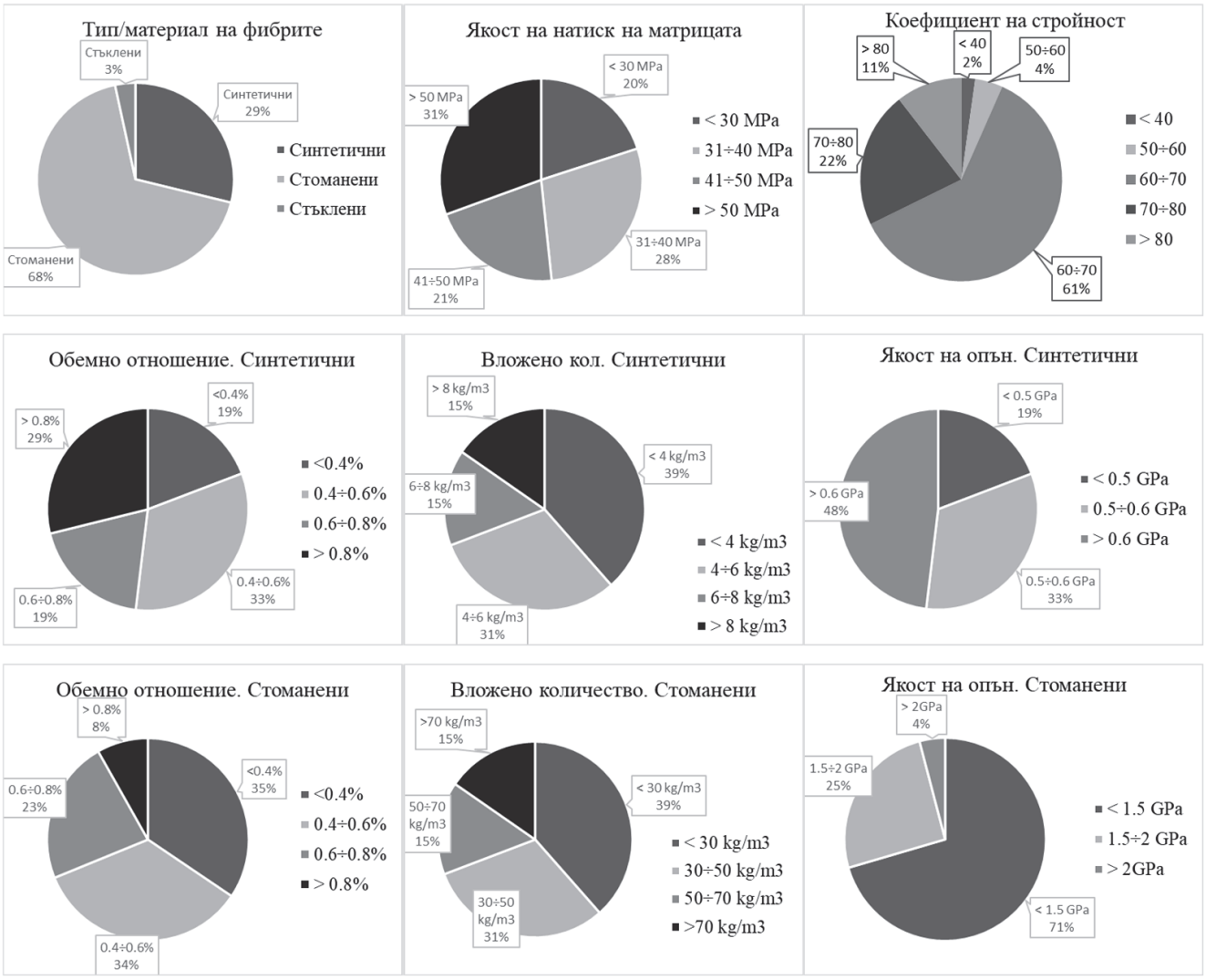
За целите на анализа допълнително са категоризирани пробите по следните показатели:

- Материал фибри: P (синтетични), S (стоманени), G (стъклени);
- Закотвяне на фибрите (куки или прищипване);
- Дължина на фибрите - l_f $[mm]$;
- Дебелина на фибрите - d_f $[mm]$;
- Коефициент на стройност - $\lambda_f = l_f/d_f$
- Количество/тегло на вложени фибри - w_f $[kg/m^3]$
- Плътност на фибрите - ρ_f $[kg/m^3]$
- Тегло на циментовата матрица - w_m $[kg/m^3]$
- Плътност на композитен материал - ρ_m $[kg/m^3]$
- Обемно съдържание - $v_f = \rho_m.w_f/(\rho_m.w_f + \rho_f.w_m)$ [%]
- Обемно отношение - $V_f = v_f/v_c$ [%]
- Якост на натиск на циментовата матрица (бетонната смес) - $f_{c,cube}$ $[MPa]$
- Якост на опън на фибрите - $f_{f,t}$ $[MPa]$
- Резултат от изпитване - Остатъчна якост $CMOD$ 0.5 $\longrightarrow$ f_{R1} $[MPa]$
- Резултат от изпитване - Остатъчна якост $CMOD$ 1.5 $\longrightarrow$ f_{R2} $[MPa]$
- Резултат от изпитване - Остатъчна якост $CMOD$ 2.5 $\longrightarrow$ f_{R3} $[MPa]$
- Резултат от изпитване - Остатъчна якост $CMOD$ 3.5 $\longrightarrow$ f_{R4} $[MPa]$

Използваните данни включват голямо разнообразие класове бетони и бетонни смеси, обемно съдържание (фракция) на влакната (V_f), коефициент на стройност (λ_f), якост на опън на фибрите ($f_{f,t}$). Събрани са данни за общо 180 броя изпитвания, от които: 52 броя изпитвани образци, армирани със структурни синтетични фибри, 122 броя изпитвани образци, армирани със стоманени фибри и 6 броя изпитвани образци, армирани със стъклени фибри. При извеждането на математическите изрази е направен и допълнителен анализ за повторяемост на данни, а именно такива събрани при проучване, в което са изследвани серии от образци.

Таблица 1. Обобщение на включените в анализа проби по специфични параметри

Материал Вид на фибрите	**Количество/ тегло на вложени фибри, kg/m³**	**Якост на натиск на матрицата, MPa**	**Якост на опън на фибрите, MPa**	**Коефициент на стройност, -**	**Обемно отношение, %**
Синтетични	2÷10	30÷67,5	450÷640	50÷90	0,2÷1,0
Стоманени	10÷80	20÷89,5	1100÷3070	44÷95	0,1÷1,0
Стъклени	2,5÷15	50÷67,5	1700	66,7	0,1÷0,6



Фиг. 3. Обзор на използваните данни

Таблица 2. Обобщение на резултатите за остатъчна якост

Материал Вид на фибрите	**CMOD 0.5 f_{R1}, MPa**	**CMOD 1.5 f_{R2}, MPa**	**CMOD 2.5 f_{R3}, MPa**	**CMOD 3.5 f_{R4}, MPa**
Синтетични	0,7 ÷ 3,17	0,8 ÷ 4,6	0,95 ÷ 4,99	1,1 ÷ 5,22
Стоманени	1,75 ÷ 10,69	1,59 ÷ 12,1	1,5 ÷ 11,03	1,34 ÷ 9,98
Стъклени	0 ÷ 2,61	0 ÷ 2,0	0 ÷ 2,0	0 ÷ 1,93

Поради малкия брой данни за стъклени фибри, тяхната слаба приложимост при тунелни облицовки и поради резултати, показващи липса на остатъчна якост, този тип фибри бяха изключени от последващите анализи.

9.2. ИЗВЕЖДАНЕ НА СТАТИСТИЧЕСКА ЗАВИСИМОСТ

Като подходящ за извеждане на статическата зависимост, базирана на включените данни, е приет следният математико - статистически метод: Полиномната регресия - представляваща форма на линейна регресия, при която връзката между променливите се представя чрез полином. За целите

на анализа е възприет методът на множествената линейна регресия, тъй като позволява сравнително лесно и еднозначно тълкуване на ефекта на отделните фактори върху зависимата променлива. Коефициентите в модела на линейна регресия имат ясно и просто тълкуване. Множествената линейна регресия е статистически метод, използван за моделиране на линейната връзка между една зависима величина (описвана) и две или повече независими (описващи) променливи. Този метод позволява да се оцени както индивидуалното, така и общото влияние на тези фактори.

Уравнение (2) представя структурата на множествена линейна регресия, чрез която резултатите от изпитването по EN 14651 се обвързват с оценката на остатъчната якост на опън при огъване на дисперсно армирания бетон в следпукнатинния стадий.

$$C = m_1 a + m_2 b + \cdots + m_5 e + I + \varepsilon \tag{2}$$

където: C е зависимата величина - в случая остатъчна якост на опън при огъване на бетона;

m_i- независими променливи ($i = 1 \div 5$);

I - свободният член на функцията;

a, b, c, d, e - регресионни коефициенти, показващи връзката между зависимата величина и независимите променливи;

ε - случайната грешка;

Независимите променливи включени в модела са количествено измерими и не са корелирани помежду си. За определяне на множествената линейна регресия се приложи Python като език за програмиране в софтуерна среда на програма - Jupyter Notebook 6.5.4. В представения код (script) са означени следните независими променливи:

m_1- Количество/тегло на вложени фибри, kg/m^3;

m_2- Якост на натиск на циментовата матрица, MPa;

m_3- Якост на опън на фибрите, MPa;

m_4- Коефициент на стройност;

m_5- Обемно отношение, %;

Проведени са изчисления при следните условия на множествена (многофакторна) линейна регресия:

Регресия [A] $$C = m_1 a + I \tag{3}$$

Регресия [B] $$C = m_1 a + m_2 b + I \tag{4}$$

Регресия [C] $$C = m_1 a + m_2 b + m_3 c + I \tag{5}$$

Регресия [D] $$C = m_1 a + m_2 b + m_3 c + m_4 d + I \tag{6}$$

Регресия [E] $$C = m_1 a + m_2 b + m_3 c + m_4 d + m_5 e + I \tag{7}$$

Регресия [F] $$C = m_1 a + m_2 b + m_3 c + m_5 e + I \tag{8}$$

Уравнения от (3) до (8) представят последователно съставени статистически зависимости, чрез които се оценява влиянието на основните параметри на бетоновата смес и дисперсната армировка върху остатъчната якост на бетона, определяна съгласно EN 14651.

Направен е преглед на първичните резултати и е направена корекция на входните данни (окрупняване на резултатите от изпитвания на идентични образци $C' = \sum_{j=1}^{n} C_j/n$), за да се сведе до минимум разликата между прогнозираните и определените от изпитване и с цел намаляване на шума и отклонението.

В табличен вид в дисертацията са представени изведените емпирични уравнения за определяне на остатъчната якост на бетон, дисперсно армиран със синтетични фибри, съответно за f_{R1}, f_{R2}, f_{R3} и f_{R4} при $CMOD = 0{,}5$, 1,5, 2,5 и 3,5 mm. За всяко ниво на отваряне на пукнатината са систематизирани няколко варианта на регресионни зависимости - от по-прости еднофакторни модели до многофакторни уравнения, включващи основните определящи параметри на композита. Чрез дескриптивна статистика са описани, обобщени и представени данните от сравнителния анализ. В дисертацията са представени и статистическите показатели, използвани за оценка на точността и надеждността на изведените регресионни зависимости.

```
In [1]: import numpy as np
        from sklearn.linear_model import LinearRegression

        # Sample data (replace this with your actual data)
        data = np.array([
            [m1, m2, m3, m4, m5, C],
            # Add more rows as needed
        ])

        # Extracting parameters a-f from the data
        parameters = data[:, :-1]
        C = data[:, -1]

        # Use linear regression to find coefficients for the equation 'C = m1*a + m2*b + m3*c + m4*d + m5*e + c'
        model = LinearRegression().fit(parameters, C)

        # Coefficients
        coefficients = model.coef_
        intercept = model.intercept_

        # Display the coefficients
        print("Coefficients:")
        for param, coef in zip(['a', 'b', 'c', 'd', 'e'], coefficients):
            print(f"{param}: {coef}")

        print(f"Intercept: {intercept}")
```

Фиг. 4. Python код (script) за определяне регресионните коефициенти

9.3. ОБОБЩЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Като резултат от проведеният анализ може да се изведат следните зависимости - уравнения от (9) до (16) за предварително определяне на остатъчната якост (за етапа на съставяне на проект). Чрез изведените зависимости ще може да се определи първоначалното количество фибри спрямо необходимата остатъчна якост, например при съставяне на алтернативно решение с дисперсно армиран бетон, спрямо стоманобетонно сечение или при определяне на остатъчната якост на бетона за вече изпълнени конструкции, при който обаче липсват изпитвания съгласно стандарт [4.3]. Освен посочените по-долу зависимости, може да се използват и някои от другите представени в дисертацията (с повече или по-малко фактори/ параметри) при отчитане на тяхната относителна точност, съгласно определеното от анализа на получените статистически данни.

9.3.1. ПРИ ПРИЛАГАНЕ НА СИНТЕТИЧНИ ФИБРИ

Уравнения от (9) до (12) представят определение в настоящата дисертация емпирични зависимости за предварително определяне на остатъчната якост на опън при огъване при прилагане на синтетични фибри. Те са изведени като резултат от проведения статистически анализ и са предназначени за етапа на съставяне на проект, когато е необходимо да се оцени първоначалното количество фибри, спрямо изискваната остатъчна якост, както и в случаите на вече изпълнени конструкции, за които липсват изпитвания съгласно БДС EN 14651.

$$f_{R1} = -3{,}358w_f + 0{,}02115f_{c,cube} + 0{,}00270f_{f,t} + 32{,}469.V_f - 1{,}606 \quad (9)$$

$$f_{R2} = -5{,}907w_f + 0{,}00216f_{c,cube} + 0{,}00195f_{f,t} + 56{,}437.V_f - 0{,}604 \quad (10)$$

$$f_{R3} = -7{,}472w_f + 0{,}00542f_{c,cube} + 0{,}00207f_{f,t} + 70{,}997.V_f - 0{,}402 \quad (11)$$

$$f_{R4} = -6{,}484w_f + 0{,}00934f_{c,cube} + 0{,}00050f_{f,t} + 62{,}100.V_f - 0{,}563 \quad (12)$$

Където:

- Количество/тегло на вложени фибри - w_f $[kg/m^3]$
- Обемно отношение - $V_f = v_f/v_c$ [%]
- Якост на натиск на циментовата матрица (бетонната смес) - $f_{c,cube}$ $[MPa]$
- Якост на опън на фибрите - $f_{f,t}$ $[MPa]$

- Остатъчна якост на опън при огъване CMOD 0.5: f_{R1} $[MPa]$
- Остатъчна якост на опън при огъване CMOD 1.5: f_{R2} $[MPa]$
- Остатъчна якост на опън при огъване CMOD 2.5: f_{R3} $[MPa]$
- Остатъчна якост на опън при огъване CMOD 3.5: f_{R4} $[MPa]$

9.3.2. ПРИ ПРИЛАГАНЕ НА СТОМАНЕНИ ФИБРИ

Уравнения от (13) до (16) представят определение в настоящата дисертация емпирични зависимости за предварително определяне на остатъчната якост на опън при огъване при прилагане на стоманени фибри.

$$f_{R1} = 0{,}085w_f + 0{,}0580f_{c,cube} + 0{,}00093f_{f,t} - 2{,}390 \quad (13)$$

$$f_{R2} = 0{,}092w_f + 0{,}0357f_{c,cube} + 0{,}00135f_{f,t} - 2{,}248 \quad (14)$$

$$f_{R3} = 0{,}090w_f + 0{,}0120f_{c,cube} + 0{,}00160f_{f,t} - 2{,}092 \quad (15)$$

$$f_{R4} = 0{,}077w_f + 0{,}0045f_{c,cube} + 0{,}00132f_{f,t} - 1{,}277 \quad (16)$$

9.4. ПОСТИГНАТИ РЕЗУЛТАТИ И НАСОКИ ЗА БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ

В Раздел 4 на дисертацията са изпълнени поставените цели и задачи в необходимия обхват и се създава основа за последващо разширяване и задълбочаване на изследванията по темата. В настоящото изследване не са разгледани в пълен обем всички фактори, оказващи влияние върху остатъчната якост на бетона, поради това разработката може да бъде допълнена след натрупване на достатъчен обем информация за водоциментното отношение (В/Ц) на бетонните смеси, използвани при изпитването на пробните образци. На базата на наличните данни може да се приеме, че по-високи стойности на остатъчната якост се постигат при по-ниски стойности на водоциментното отношение (В/Ц ≤ 0,4). За улесняване на инженерната/ проектантската практика също така може да бъде изведена и функционална зависимост между отделните стойности на остатъчната якост, например $f_{R3} = f(f_{R1})$, въз основа на пълния набор от налични експериментални данни.

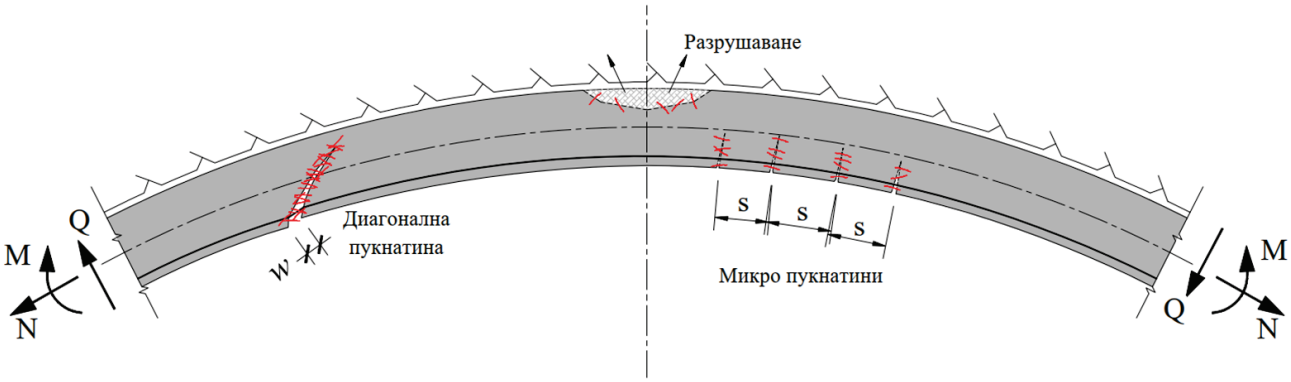
Допълнително, при отсъствие на възможност за изпитване съгласно стандарт [4.3], може да бъде потърсена корелационна зависимост между резултатите от изпитването на капацитета за поемане на енергия (съгласно стандарт БДС EN 14488-5) и остатъчната якост. За постигане на такава цел е необходимо провеждането на едновременни изпитвания на пробни образци с идентични показатели на бетоновата смес и на вложената дисперсна армировка.

10. РАЗДЕЛ 5: УРАВНЕНИЕ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НОСЕЩА СПОСОБНОСТ НА СЕЧЕНИЕ ПОДЛОЖЕНО НА ОГЪВАНЕ, В КРАЙНО ГРАНИЧНО СЪСТОЯНИЕ (ULS), НА ДИСПЕРСНО АРМИРАНА ТУНЕЛНА ОБЛИЦОВКА, СЪГЛАСНО ТЕОРЕТИЧНИТЕ ПОСТАНОВКИ НА ЕВРОКОД 2

С използване на дисперсна армировка (стоманени и полимерни влакна) в тунелните облицовки се осигурява икономично и оптимално използване на материалите и ресурсите, спрямо решенията с конвенционална армировка (стоманени пръти). В Раздел 5 е разработен подход за извеждане на инженерна (емпирична) зависимост за определяне на носещата способност на огъване на дисперсно армирано сечение, приложима при тунелни облицовки от пръскан бетон. Чрез параметричен анализ е изследвано влиянието на основните физико - механични параметри върху носеща способност на огъване, а получените резултати са обработени статистически. На тази основа са изведени междинни зависимости, които впоследствие са обобщени в окончателно инженерно

уравнение (21). То отчита влиянието на якостта на бетонната матрица, остатъчната носимоспособност след напукване и дебелината на сечението. Определени са и границите на приложимост на зависимостта, включително диапазонът на валидност за бетоните от C20/25 до C50/60 и условията за осигуряване на минимална дуктилност. С прилагането на дисперсна армировка, самостоятелно или в допълнение към конвенционалната, се увеличава носещата способност на тунелните облицовки за поемане на срязващи и опънни сили, огъващи моменти. Подобрява се устойчивостта срещу продънване, крехко срязване, подобрява закотвянето на редена армировка.

Също така често срещан проблем при стоманобетонни конструкции, армирани с конвенционална (прътова) армировка е образуването на пукнатини. Тези нежелани пукнатини могат сериозно да повлияят на състоянието на конструкцията, а тяхното отстраняване обикновено изисква значителни финансови и времеви ресурси. С приложението на дисперсно армиран бетон се подобряват характеристиките на напречното сечение в етапа след пукнатинообразуване, което води до дуктилно поведение на материала.



Фиг. 5. Ефекти от дисперсната армировка върху носещата способност

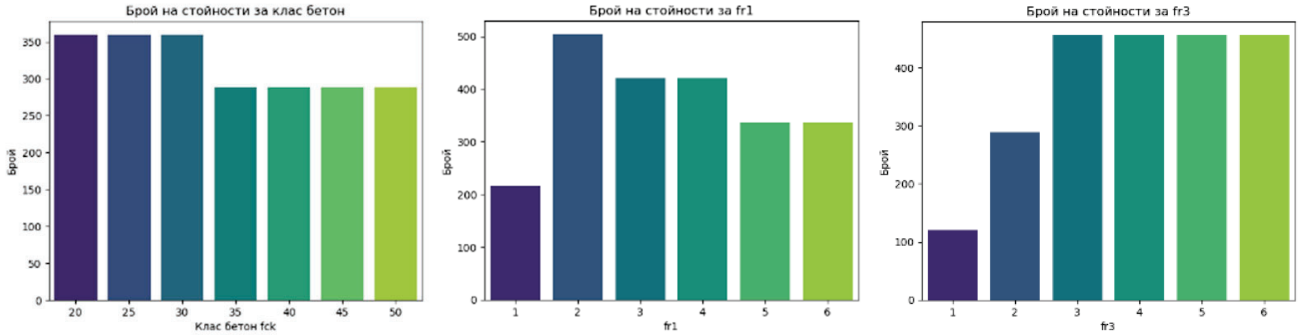
Дисперсно армираните тунелни облицовки имат по-голям капацитет за поемане на енергия след напукване, спрямо пръскан бетон с армировъчни пръти. Това поведение на дисперсно армираните облицовки се основава на остатъчната якост на опън или на количеството за поемане (абсорбция) на енергия. Дисперсно армираните облицовки имат значителното предимство спрямо обикновените, тъй като се ограничава образуването и развитието на дълбоки пукнатини (не се предотвратява изцяло напукването, но се ограничава неговото развитие), а микропукнатините са ограничени само около повърхността на елемента.

Раздел 5 има за цел да представи методиката за оразмерителна проверка и изведе уравнение за провеждане на оразмерителна проверка на бетонни сечения, подложени на огъване, армирани с дисперсна армировка. Въз основа на теоретичната основа, представена в Раздел 2 са проведени оразмерителни проверки за определяне на носещата способност на дисперсно армирана тунелна облицовка с дебелина h от 50 до 500 mm, при класове по якост на натиск от C20/25 до C50/60 и при класове по остатъчна якост за дисперсно армиран бетон от $R_1$1 до $R_1$6 и от $R_3$1 до $R_3$6. На тази база е създадена база от данни с 2232 броя отделни стойности за носеща способност на огъване в крайно гранично състояние (ULS).

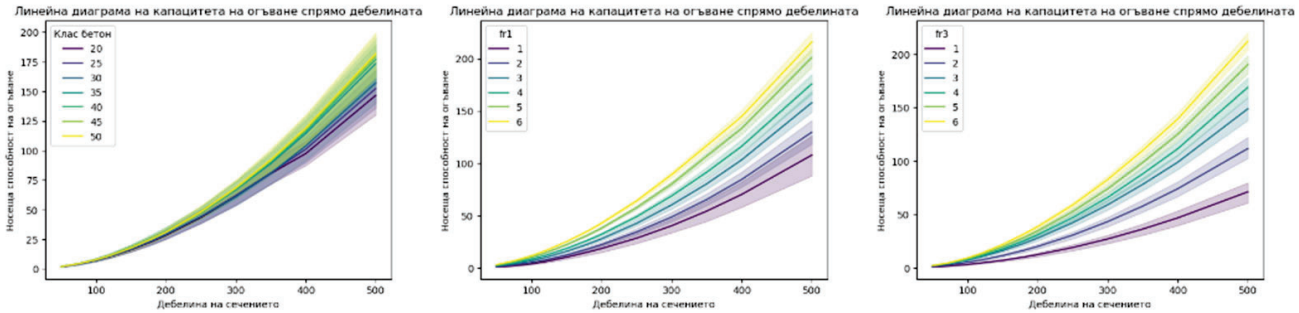
В табличен вид са систематизирани изчислените стойности, чрез които се извършва съпоставка между отделните оразмерителни случаи в зависимост от приетите материални характеристики, параметрите на дисперсната армировка и работните хипотези на модела.

Таблица 3. Обобщение на резултати носеща способност за $M_{rd,ULS}$

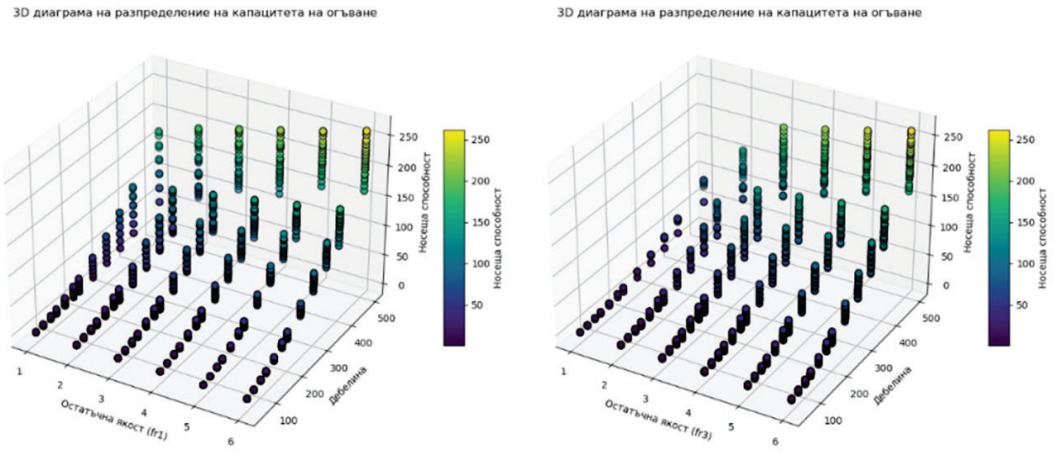
$M_{rd,ULS}$	h=50 mm, kNm	h=75 mm, kNm	h=100 mm, kNm	h=120 mm, kNm	h=150 mm, kNm	h=180 mm, kNm	h=200 mm, kNm	h=250 mm, kNm	h=300 mm, kNm	h=350 mm, kNm	h=400 mm, kNm	h=500 mm, kNm
Min	0,514	1,147	2,005	2,867	4,440	6,343	7,793	12,048	17,189	23,204	30,083	46,394
Max	3,231	7,181	12,626	18,031	27,867	39.686	48,628	74,643	104,38	134,63	170,51	261.45



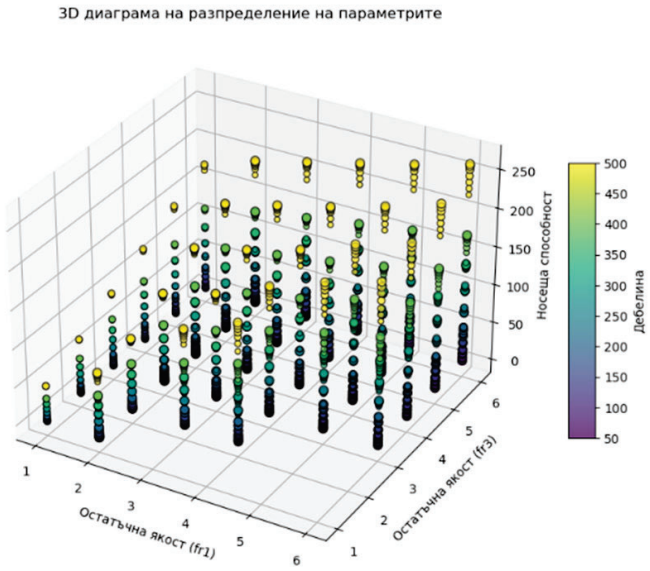
Фиг. 6. Обобщение по брой стойности по параметри



Фиг. 7. Носеща способност на сечение на огъване



Фиг. 8. Разпределение на носеща способност на сечение на огъване $(f_{R,1/3}/h/M_{rd})$



Фиг. 9. Разпределение на носеща способност на сечение на огъване $(f_{R,1}/f_{R,3}/M_{rd})$

10.1. СТАТИСТИЧЕСКА ОБРАБОТКА

Въз основа на получените данни се извършва статистическа обработка на данните, с цел да бъде определена математическа зависимост описваща носеща способност на бетонно сечение армирано с дисперсна армировка, подложено на огъване.

Уравнение (17) въвежда общата функционална зависимост между носещата способност на огъване на дисперсно армираното бетонно сечение и основните определящи параметри, а именно класът на бетона на натиск, класовете по остатъчна якост и дебелината на сечението.

При съставяне на уравненията, следния подход на представяне на променливите е възприет:

- с X_1 се представя класа на бетона на натиск - f_{ck};
- с X_2 се представя класа по остатъчна якост - $f_{R,1}$;
- с X_3 се представя класа по остатъчна якост - $f_{R,3}$;
- с X_4 се представя дебелината на сечението - h;
- с Y се представя носещата способност на сечение на огъване - M_{rd};

$$\mathrm{Y} = f(X_1; X_2; X_3; X_4) \tag{17}$$

Първоначално се подходи с използване на множествена (многофакторна) линейна регресия и/или полиномна регресия, но резултатите от прилагането им са незадоволителни. Поради това се направи анализ с цел определяне на тежестта (importance factor) на отделните параметри върху стойността на носещата способност. За определянето им е приложен алгоритъм за машинно обучение (асемблов метод) “Random Forest” чрез машинен код в Python. Резултатите са представени в Таблица 4, от които може да се направи извод, че основно влияние има дебелината на сечението, последвано от остатъчната якост.

Таблица 4. Тежест на отделните фактори

Параметър	X1	X2	X3	X4
Importance factor	0,0040	0,0674	0,0696	0,8589

За целите на анализа се съставиха множество индивидуални уравнения за носеща способност, при използване на четирите параметъра - клас на бетон, остатъчна якост и дебелина. След преглед на получените резултати и съответните математически преобразувания, следните три уравнения бяха окончателно изведени:

Eq. I. $$\mathrm{Y} = a.\sqrt{X_1} + b.\left(\frac{X_2}{\sqrt{X_3}}\right) + c.(X_4)^{0,7\mathrm{e}}.(X_2 + X_3) + d \tag{18}$$

Eq. II. $$\mathrm{Y} = a.\sqrt{X_1} + b.\left(\frac{X_2}{\sqrt{X_3}}\right) + c.(X_4)^{0,65\mathrm{e}}.(X_2 + X_3) \tag{19}$$

Eq. III. $$\mathrm{Y} = a.\sqrt{X_1} + b.\sqrt{\frac{X_2}{X_3}} + c.(X_4)^{\frac{2}{3}.\mathrm{e}}.(X_2 + X_3) \tag{20}$$

Уравнения от (18) до (20) представят заключителен етап от аналитичното формулиране на модела за определяне на носеща способност на огъване M_{Rd} на дисперсно армираното сечение. Значението на тези уравнения се изразява в това, че чрез тях теоретичната постановка се трансформира в практически приложим инструмент за оценка. На база на посочените в Таблица 4 коефициенти, се съставиха нови редици от резултати за носеща способност на огъване. Тези резултати са сравнени и е направена статистическа оценка на грешката/отклонението на отделните зависимости. Чрез дескриптивна статистика са описани, обобщени и представени данните от сравнителния анализ.

10.2. УРАВНЕНИЕ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НОСЕЩА СПОСОБНОСТ НА ОГЪВАНЕ

След математически и статистически анализ и преглед на данните, се определи следното уравнение, което достатъчно коректно описва носеща способност на дисперсно армирано сечение в крайно гранично състояние (ULS), подложено на огъване, съгласно изискванията на Еврокод 2 [5.1]:

$$M_{rd} = 0{,}166.\sqrt{f_{ck}} - 0{,}906.\sqrt{\frac{f_{R,1}}{f_{R,3}}} + 0{,}00028.(h)^{\frac{2}{3}}.\mathrm{e}.(f_{R,1} + f_{R,3}) \qquad (21)$$

където M_{rd} е носеща способност на огъване на дисперсно армирано сечение, Nmm;

f_{ck} е характеристична цилиндрична (5%) якост на натиск на бетона, MPa

$f_{R,1}$ е остатъчната якост на опън при огъване, съответстваща на $CMOD_1 = 0{,}5\ mm$, MPa;

$f_{R,3}$ е остатъчната якост на опън при огъване, съответстваща на $CMOD_3 = 2{,}5\ mm$, MPa;

h е височина/ дебелината на напречното сечение, mm;

e - неперово (ирационално) число, e≈2,718;

С цел да бъде осигурена минималната дуктилност (да се избегне крехко разрушение), следните гранични условия са поставени $\frac{f_{R,1}}{f_{ctk,0,05}} \geq 0{,}5$ и $C_2 = \frac{f_{R,3}}{f_{R,1}} \geq 0{,}5$ са валидни.

Уравнението е валидно за класове бетон по якост на натиск от C20/25 до C50/60.

Уравнение (21) представя окончателно изведената инженерна зависимост за определяне на носещата способност на огъване на дисперсно армирано сечение, приложима при оразмеряване на тунелни облицовки от пръскан дисперсно армиран бетон. Формулата обединява в аналитичен вид влиянието на якостните характеристики на бетонната матрица, изразени чрез характеристичната цилиндрична якост на натиск, остатъчната носимоспособност след напукване, отчетена чрез параметрите f_{R1} и f_{R3}, както и геометричния параметър на сечението - неговата дебелина h.

10.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дисертационния труд е разработена количествена основа за оценка на носещата способност и поведението на дисперсно армирани тунелни облицовки. Идентифицирана е високата чувствителност на носещата способност към дебелината на напречното сечение и потвърждава необходимостта този параметър да се разглежда като определящ при оразмерителните проверки. Изведената зависимост добре описва носещата способност на огъване в крайно гранично състояние (ULS), за дисперсно армирана тунелна облицовка. Приложението в практиката при конструктивен анализ, предоставя бърз метод за проверка на носещата способност на сечение или при определяне на необходимата дебелина на тунелна облицовка.

Уравнението може да бъде допълнително преработено с цел да отчете надлъжни опънни сили. При натискови надлъжни сили, уравнението може да бъде използвано, тъй като резултат се получава консервативно решение.

11. РАЗДЕЛ 6: ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ПРОБЕН УЧАСТЪК ПО ОБСЕРВАЦИОНЕН МЕТОД С ДИСПЕРСНО АРМИРАНА ОБЛИЦОВКА

Значителното деформиране на първична тунелна облицовка (крепеж), при прокопаване в слабо скални масиви, може да бъде причинено от множество и различни по произход фактори.

По време на изпълнение на двутръбен железопътен тунел със значителна дължина се констатира настъпването на значителни по размер и степен на повреди и деформации в тунелната облицовка (образуване на пукнатини и локални изпадания на пръскан бетон). Констатира се също така изпадане на части от пръскан бетон. Стоманената армомрежа в участъка на надлъжните

пукнатини е силно компрометирана, провлачена и на места дори скъсана, под действието на реализиращите се големи премествания.



Фиг. 10. Настъпили повреди по крепежната конструкция, разкрити при репрофилиране Път 1, участък при 33+300.

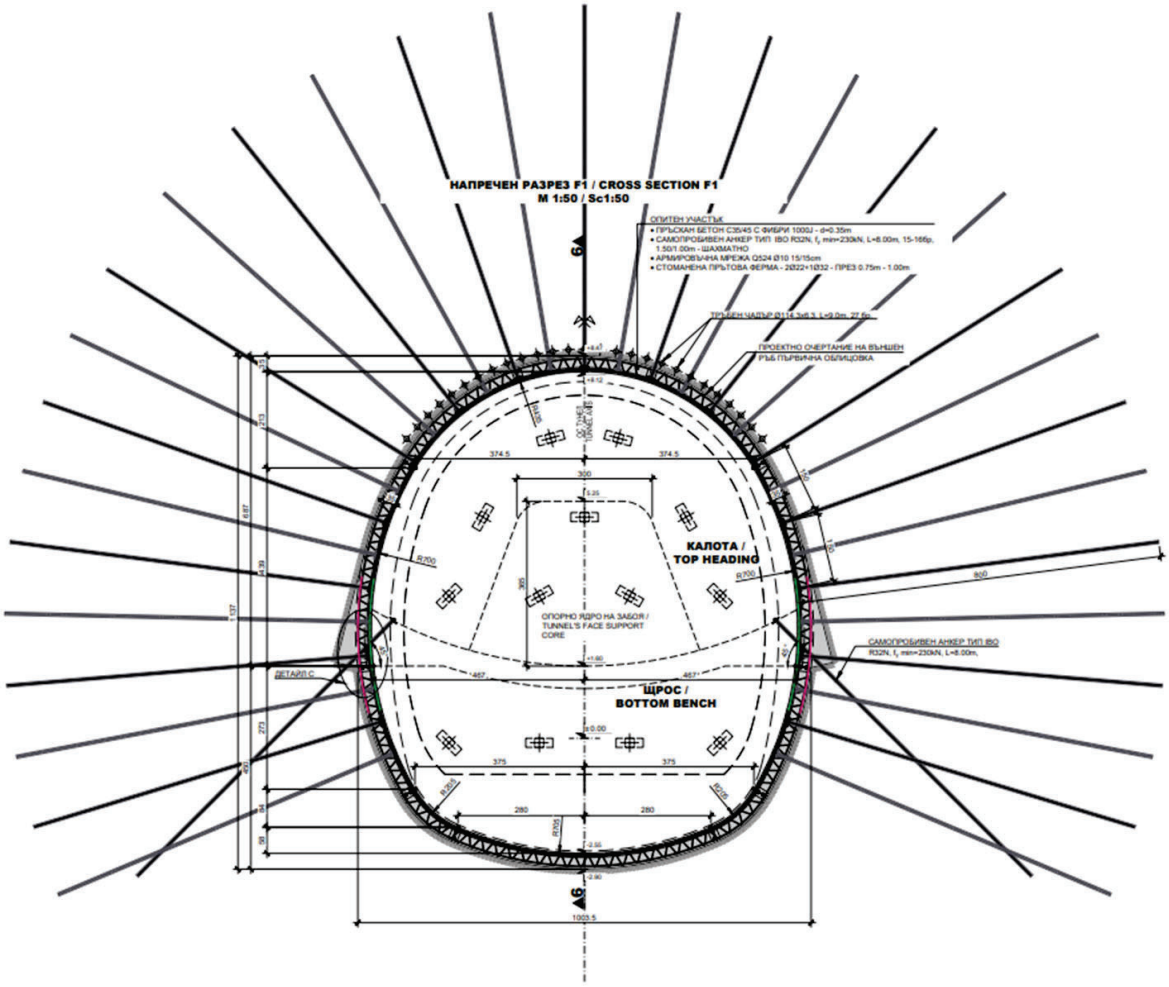
Въз основа на изложеното в Раздели 4 и 5, в Раздел 6 е прието да се приложени метода на наблюдение (обсервационен метод) и е направено оразмеряване на новопредложената тунелна конструкция с използване на зависимостите за остатъчната якост на опън при огъване и на изведената процедура за определяне на носещата способност на дисперсно армирано сечение в крайно гранично състояние (ULS) и експлоатационно гранично състояние (SLS).

Прилагането на обсервационния метод в разглеждания случай е обусловено от изискването проектното решение за първичната облицовка да бъде разработено, изпълнено, наблюдавано и при необходимост коригирано в процеса на строителството, в зависимост от действително проявеното поведение на системата „скален масив - тунелна облицовка“. За съставяне на проектното решение първоначално са определени допустими граници на поведение, изразени чрез контролни стойности на деформациите, които да бъдат проследявани чрез система за наблюдение.

В рамките на тази постановка е прието конструктивно решение с дисперсно армирана първична облицовка от пръскан бетон с дебелина 350 mm, бетон клас С35/45 и конструктивни синтетични фибри с минимално съдържание 4 kg/m³. Новопредложената тунелна конструкция не е определена единствено въз основа на традиционен емпиричен избор на крепеж, а е оразмерена в етапа на разработване на крепежната схема по метода на наблюдението, при параметри на скалния масив и на конструктивната система, определени чрез обратен анализ. Съществен момент в раздел 6 е, че приложението на разработената методика не приключва с етапа на предварителното оразмеряване. Така Раздел 6 изпълнява ролята на практически преход между изведените в Раздел 4 зависимости за остатъчната якост на опън при огъване на дисперсно армирания бетон, формулираната в Раздел 5 методика за оразмеряване на сечение на огъване и тяхното реално инженерно приложение при изпълнение на пробен участък по обсервационния метод.

Като разлика спрямо предходно изпълнявани крепежи в участъка е приложението на дисперсно армиран временен контрасвод на етап Калота, с който се ограничават също така деформациите и разхлабването на масива и ограничаване на пластичната зона в масива. Също така се преминава към двуетапно изпълнение на тунела - калота, щрос. Изпълняваният третичен етап на

постоянен контрасвод се изпълнява едновременно с работите за щрос. Крепежът с дисперсна армировка се изпълнява с първоначално деформационен толеранс от min. 200 mm, с цел недопускане навлизания в габарита на вторичната облицовка, при настъпване на неочаквани деформации. Дисперсно армираната първична тунелна облицовка (крепеж) се изпълнява от пръскан бетон с клас по якост на натиск С35/45, с минимална обща дебелина 350 mm, изпълняван на пластове по 50 mm.



Фиг. 11. Крепеж за опитен участък.

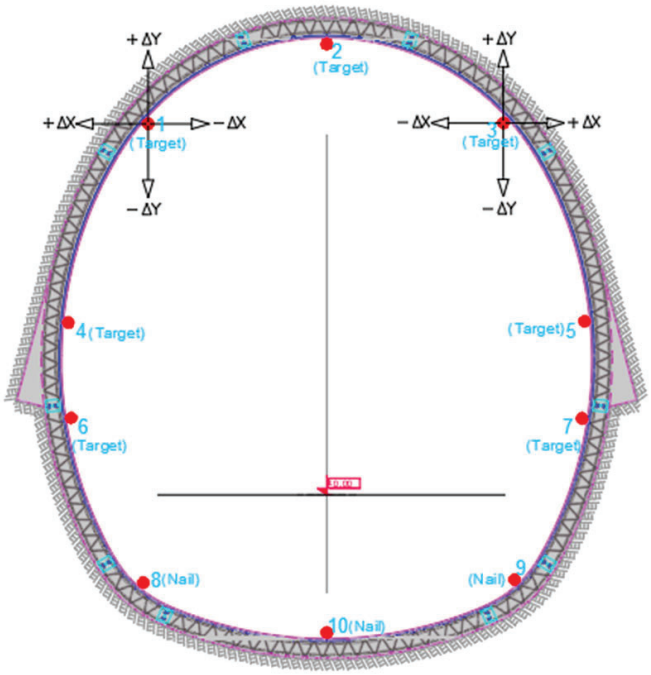
Описание на съставената нова конструкцията на първичната облицовка:

- Първият пласт пръскан бетон (върху почвения масив) се изпълнява с дисперсно армиран торкрет бетон.
- В зоните с надработки се прилага за тяхното запълване дисперсно армиран торкрет бетон.
- Всяка армоферма се стабилизира на ниво Калота с диагонални самопробивни инжекционни IBO анкери R32N, с дължина 8,0 метра, изпълнени през армофермата, на височина 50 cm, под наклон 45 до 60 градуса спрямо хоризонта.
- Изпълнява се временен контрасвод с дебелина 500 mm, максимално/ непосредствено близо до забоя.
- Предвидените анкери по стени се удължат от 4,0/6,0 m на 8,0 m. Всички анкери се изпълняват като самопробивни инжекционни анкери Тип IBO R32N.
- В свода се изпълняват радиални самопробивни инжекционни анкери (между тръбите на тръбния чадър), тип SDA/IBO анкери R32N (или аналогичен), с дължина 8,0 m, напълно инжектирани по цялата дължина.
- Премахват се дървените трупчета в петите на армофермата. Вместо тях се полагат стоманени планки с размер 350x350x30 mm.

- Изпълняват се стъпки от дисперсно армиран бетон (тип „слонска пета“).
- Прилага се изпреварващо стабилизиране на забоя със самопробивни инжекционни анкери, изпълнени в забоя с дължина 8 до 12 метра и минимално застъпване 3,0 m, 1 бр. на всеки 3m^2 от площта на забоя, с цел недопускане на свличане на забоя.
- Прилагат се стоманени арммрежи с минимално разстояние между отделните пръти 150 mm, Тип Q524 (d10@150mm) под анкерните глави, с цел недопускане на продънване.
- Стоманената арммрежа към скалния масив, се заменя с дисперсно армиран торкрет бетон 1000J, изпълняван в цялото сечение.
- Изисква се работите да се изпълняват бързо и циклично, без каквото и да е забавяне, с цел недопускане на допълнително разхлабване на масива.
- След пълното затихване на деформациите, временният контрасвод се изпълнява поетапно (на малки/ локални участъци с дължина до 2 m).

За изпълнение на тунелните работи по метода на пробен (опитен) участък, при който да се прилага „Обсервационен метод“ (Метод на наблюдението), съгласно БДС EN 1997-1. За целта на приложението на обсервационният метод са определени: допустими граници на поведение - критични деформации в диапазона 50 mm (съответно хоризонтални и вертикални) и до 80 mm общи деформации; Съставен план за наблюдение, с изпълнението на който се контролира действителното поведение; Създадена е организация за анализ на резултатите и навременно уведомяване; Съставен е план на възможните мерки, които да се приложат в случай, че измерванията показват поведение извън допустимите граници.

Всеки мерителен профил (деформационна станция) се изпълни с 10 точки на измерване. Деформационните станции (профили) се изпълняват през разстояние 1,0 m, по дължина на тунела.



Фиг. 12. Мерителен Профил, при обсервационен метод

Интервали от време, през които измерването на точката на деформация се повтаря:

- 1 път на всеки 8 часа през първия ден;
- 1 път на ден между 2 -ри и 7-ми ден;
- 3 пъти седмично от 7-ми до 15-ти ден;
- 2 път седмично между 15-ия и 30-ия ден;

След това наблюденията на деформацията ще се правят не по рядко от 1 път месечно. Интервалите се повтарят след изпълнение на щрос и постоянен контрасвод, както и при работа в съседна (паралелна) тунелна тръба. Непрекъснатият анализ на резултатите и тяхното тълкуване се използва за проверка на проектните допускания.

Определени са следните алармени нива, на база очакваните деформации, опит при изпълнение на подобни тунели, инженерна практика и разбира се възможностите на системата за наблюдение:

- „Алармено ниво 0“ - деформациите са по-ниски от 50 mm.
- „Алармено ниво 1“ при деформации 50 mm (70% от изчислените). Достигане на ниво на предупреждение. Като допълнителна мярка се прилага намаляване времевият интервал между наблюденията.
- „Алармено ниво 2“, при деформации 80 mm (100% от изчисленото). Достигане на ниво на деформациите, дължащо се на повтарящо се, прогресивно нарастване на преместването. Следва да се определи дали е свързано с изпълняваните строителни дейности или не.
- „Алармено ниво 3“ при деформации 120 mm (150% от изчисленото) - работите се преустановяват.

Следва да се отбележи, че наблюдаваните деформации от системата за наблюдение, пропускат част от началните, тъй като монтажа на мерителните профили се изпълнява при напълно изпълнена крепежна конструкция.

В периода от 08.11.2024 г. до 20.05.2025 г. текущо се проведоха наблюдения върху пробен участък, в който е приложен т.н. „Обсервационен метод“. След приключване на пробния участък, е направен анализ на резултатите с цел да се определи решение за продължаване на тунелните работи.

На база на обратни изчисления се констатира, че образуващата се пластична зона е била със значителни размери (повече от 10-12 m) и това е довело до силно предварително разхлабване на скалният масив по Път 2.

След това се наблюдават слените ефекти:

- второетапната тръба се изпълнява в масив със значително влошени физико механични и деформационни показатели.
- След реализирането и на пластичната зона около второетапната тунелна тръба, то тези зони се обединяват, като поради това обстоятелство свода на обрушване над двете тунелни тръби се обединява и следва да се разглежда като сбор на широчините на двете тунелни тръби, целика между тях и прилежащите зони в страни от тунелните изработки (от външната страна) - схематично изображение е представено на фиг. 13.
- По този начин анкерите са с недостатъчна дължина да бъдат закотвени.

На Фиг. 13 е представено неблагоприятното обединяване на двата свода на обрушване, възникващо при развитие и сливане на пластичните зони (показани с червено) около двете тунелни тръби. Това води до формиране на обща зона на разхлабване със значителни размери, увеличаване на натоварването върху крепежната конструкция и риск от недостатъчно закотвяне на анкерите извън контура на свода на обрушване.

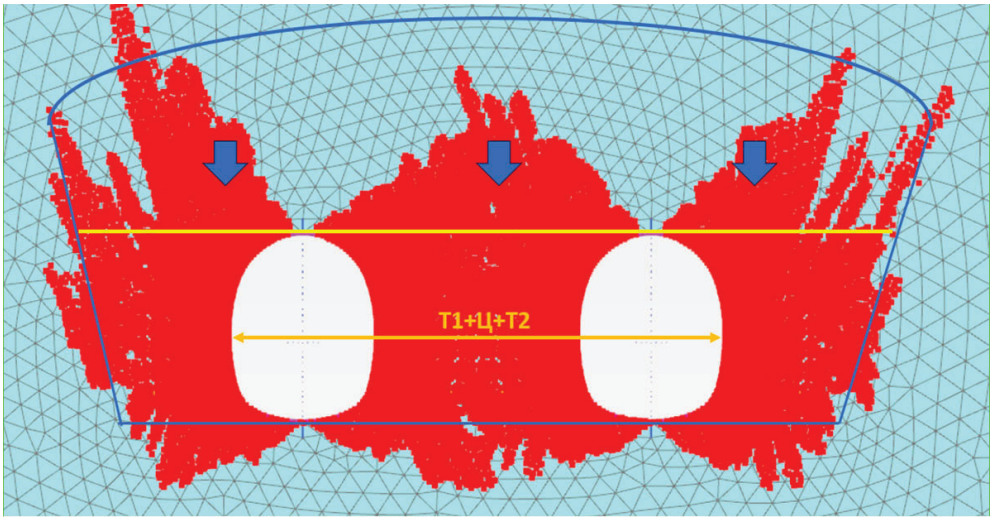
На Фиг. 14 е показан случай на прилагане на крепежна система, осигуряваща недопускане на сливането на двата свода на обрушване, при което всяка тунелна тръба запазва самостоятелен деформационен и носещ контур. Подобно конструктивно решение ограничава развитието на пластичните деформации в целика между двете изработки, намалява степента на претоварване на първичната облицовка и създава по-благоприятни условия за устойчивата работа на тунелната система в етапа на строителство и последваща експлоатация.

В участък след km. 33+395,00 се наблюдава ограничен размер на настъпващи деформации - до 40 mm, поради което се счита че зоната на обрушване е с по-малък размер спрямо предходни зони. Сводовете на обрушване вероятно са формирани като самостоятелни - съгласно схематичното представян на фиг. 14.

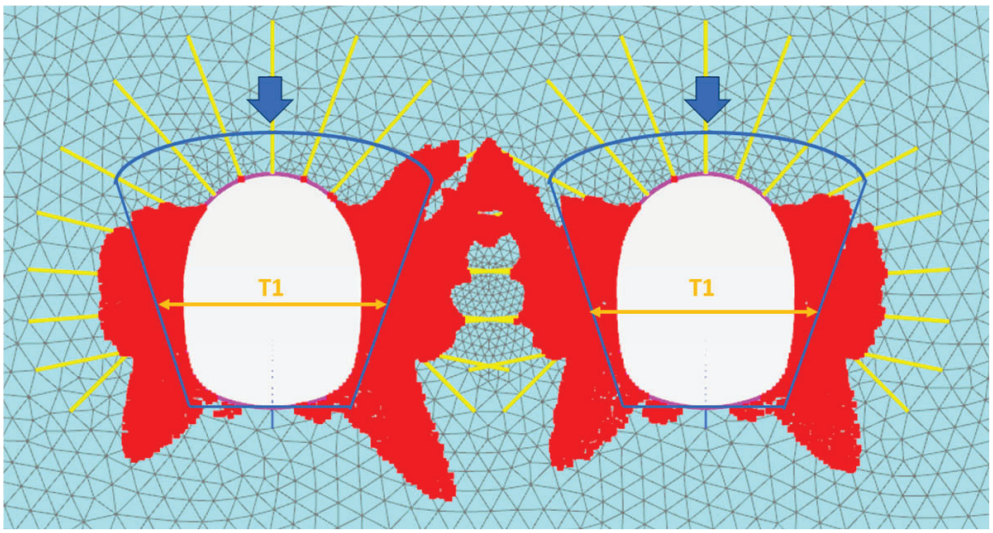
Деформациите следват предварително определения модел на развитие - за очакваното поведение (модел на развитие) на настъпващите деформации (премествания), при наличието на

изпълнен временен контрасвод. Също така се потвърждава и модела на поведение при наличие на влияние на поредица от силно наклонени тектонски зони, разположени суб-паралелно на оста на тунела, като се наблюдава:

- концентрация на напрежение между лявата странична стена и тектонска зона извън тунела, като това води до големи премествания на лявата странична стена;
- наличие на допълнителна тектонска зона в близост до дясната странична стена което води до увеличаване на преместванията и на дясната странична стена;



Фиг. 13. Схема на обединяване на двата свода на обрушване



Фиг. 14. Схема на при прилагане на крепеж осигуряващ недопускане на сливането на двата свода на обрушване

В участъците с тектонски зони през профила, поведението на тунелната конструкция е спрямо очакванията.

Извършеният геодезически мониторинг, подкрепен и от множество огледи на място, контрол и анализ на отчитаните/ измерените деформации, показват, че в пробните участъци на Път 1 и Път 2 първичната тунелна облицовка запазва своята носеща способност и експлоатационна годност при реализираните деформации. След извършеният преглед и анализ на резултатите от изпълнението на участък, изпълняван по обсервационен метод (метод на наблюдението), предложен за изпълнение като „пробен“, може да се констатира, че се потвърждават вече изведените/ представените изводи, като допълнително може да се посочи че:

(1) С прилагането на крепежа за пробен участък (състоящ се от дисперсно армиран пръскан бетон) не се допуска образуването на големи пластични зони (разхлабвания) в масива, което е основната цел на съставения крепеж.

(2) Осигурява се необходимият контрол (ограничават се) върху настъпващите деформации.

(3) Конструкцията/ крепежа запазва своята носеща способност (ULS) и експлоатационна годност (SLS), съгласно проектните изисквания.

(4) В участъците на същински пробен участък не са достигнати стойности на деформациите „Алармено ниво 1“. Деформациите са ограничени до 40-50 mm.

(5) Постоянното редуване на по-слаби (тектонски) зони и зони с частично по-здрави блокове и комплекси (отделни участъци от пълния профил - например в калота или щрос) изисква приложението на обсервационен метод, тъй като този тип условия и тези зони не са били идентифицирани с инженерно геоложките проучвания.

(6) Необходимо е да се води стриктна геоложка картировка, да се изпълняват изпреварващи хоризонтални сондажи (разположени на 9, 12 и 3 часа), с които да се проучват/ оценяват, очакваните инженерно геоложки условия, напред (от забоя) в масива, като спрямо тези резултати да се взимат решения за допълнение или отпадане на отделни елементи от крепежа.

(7) В рамките на всеки 50 метра от тунела следва да се провежда анализ на резултатите и определяне на концепция/стратегия за изпълнение на последващ участък, спрямо резултатите от изпълнените.

Като важен фактор се идентифицира необходимостта да се следи за наличието на тектонски зони, зони с нехарактерни условия (редуващи се слаби и относително по-здрави условия), водонаситени зони или зони със значителен водоприток. В тези зони, както и в техния ареал, следва да се прилага крепеж за пробен участък, без значение определеният клас (RMR) за масива, поради голямата несигурност при определеното му поради наличието само на фрагменти от информация. Категоризирането на масива по Rock Mass Rating - RMR (Bieniawski) в сложното напрегнато състояние, вероятно остава недостатъчно добре определено при полевите работи, като в отделни зони не се отчитат (и съответно се пропускат) съществени за тунелния крепеж въздействия. При изпълнение на тунел в масив с множество тектонски зони, интензивно променящи се условия и високи хоризонтални напрежения, самостоятелното приложение на класификационна система RMR/ Bieniawski не е достатъчно надеждно. На база резултатите от изпълнението и мониторинга на участък изпълняван по обсервационен метод („пробен участък“) в условия на висока геоложка сложност/ неопределеност и непредсказуемо геотехническо поведение на скалния масив, се потвърждава целесъобразността от прилагането на обсервационен метод като основен подход за проектно и техническо обезпечаване на тунела.

Обсервационният метод осигурява гъвкав механизъм за адаптиране на укрепителните мерки в реално време, спрямо регистрираното поведение на масива. Това е особено важно в участъци, характеризиращи се с тектонски зони, слабо свързани скали, зони с високи хоризонтални напрежения и/или наличие на водонапорни аномалии.

Изпълнението на пробния участък по метода на наблюдение показа, че предварителното базиране на укрепителните решения, изключително върху стойности от класификационни системи (напр. RMR на Bieniawski), не е достатъчно надежден метод в такива условия, и не следва да се използва като самостоятелна основа за определяне на крепежа от страна на Изпълнителя. Вместо това се препоръчва интегриран подход, при който геоложките оценки служат като начална хипотеза, а проектните решения се валидират и оптимизират чрез наблюдение на реалното поведение на тунелната конструкция. Препоръчва се и изпълнението на вторичната облицовка да бъде координирано с резултатите от мониторинга, като в участъци с не затихнали деформации се предвиди нейното проектиране с отчитане на остатъчния натиск от масива, или да се предприемат мерки за окончателно стабилизиране на първичната конструкция. В зони, в които деформациите не са напълно затихнали, следва изрично да бъде взето проектно решение за отчитане на остатъчния натиск от скалния масив при проектирането и изпълнението на вторичната облицовка. Това е необходимо, тъй като натоварването в тези участъци може да доведе до допълнителни напрежения в конструкцията след изпълнение на вторичната обвивка. В случай, че вторичната облицовка бъде изпълнена в участъци с не затихнали деформации без допълнителни мерки за усилване, съществува риск от последващи деформации, пукнатини или конструктивни повреди. Това от своя страна би наложило допълнителна намеса, включително:

- усилване и/или реконструкция;
- въвеждане на компенсаторни връзки или нова обосновка на статическата работа на тунелната конструкция;
- непредвидени строителни и времеви разходи.

От научно-приложна гледна точка постигнатите резултати са особено важни. Анализът на наблюденията показва, че при приложеното решение, крепежната конструкция с дисперсна армировка запазва своята носеща способност и експлоатационна годност, без образуване на видими пукнатини (вероятно и без реализирани на пластични стави), без навлизане в профила на бъдещата вторична облицовка и без конструктивно влошаване в същинския пробен участък, при разглежданите инженерно геоложки условия, приложеното проектно решение и осъществения мониторинг.

В участъците на същински пробен участък не са достигнати стойности на „Алармено ниво 1“, като деформациите са били ограничени до около 40 mm, което е под предварително заложените гранични стойности и представлява ясен критерий за ефективност на приложеното решение. Съществен резултат е и доказването на предимството на метода за незабавно измерване чрез директно поставяне на геодезически гвоздей.

Наблюденията показват още, че развитието на деформациите е с бавен ход и с ясно изразена тенденция към затихване, като пълното им затихване се реализира в интервал от около 30 до 90 дни, а в част от участъците е отчетено окончателно затихване след 20.03.2025 г. Това позволява да се направи важен практически приложим извод, че при подобни условия поведението на системата „масив - крепеж“ не трябва да се оценява по единична стойност или моментна реакция, а по закона на развитие и затихване на деформациите във времето.

Много важен е и резултатът, че приложението на дисперсно армиран пръскан бетон в комбинация с високоякостен бетон, анкериране, временно затваряне с контрасвод и строго контролирана технологична последователност е довело до ограничаване на пластичните зони и овладяване на деформациите, като в пробния участък не се наблюдава развитие на пукнатини, въпреки наличието на съществени премествания.

Наред с това, полевата работа е довела и до редица обобщения с по-широка методическа стойност. Потвърдено е, че в условия на редуване на тектонски зони и относително по-здрави блокове, които не са били предварително надеждно идентифицирани от инженерно-геоложките проучвания, обсервационният метод не е само допустим, а практически необходим.

Установено е също, че използването само на RMR-класификация не е достатъчно надеждно при такава сложна геоложка среда и че е необходимо допълване с обратен анализ, по-детайлно наблюдение, изпреварващи сондажи и периодичен преглед на стратегията през всеки следващ участък от тунела.

Извършената полева работа представлява значителен по обем и със съществен научно - приложен принос от натурен (in-situ) експеримент в реални строителни условия, чрез който е доказана приложимостта на разработения подход за дисперсно армирана първична облицовка, приложена по обсервационен метод. Постигнатите резултати имат едновременно научен, проектантски и строително-технологичен характер: (1) потвърден е капацитета за овладяване на деформациите, съхраняване на носещата способност и безопасно продължаване на изкопните работи; (2) потвърдена е необходимостта от непрекъсната връзка между мониторинг, инженерно-геоложко наблюдение и проектни корекции; (3) доказано е, че при сложни и непредсказуеми условия обсервационният метод следва да се разглежда като основен инструмент за управление на тунелното строителство, а не като спомагателна процедура.

Допълнително извършеният критичен анализ на класификационната система RMR на Bieniawski е разработен в качествен аспект, независимо от конкретно разглеждания тунелен участък и от частните инженерно-геоложки условия по него. В този смисъл анализът не се изчерпва с рамките на конкретното приложно изследване, а има по-общ методически характер, тъй като обхваща принципни ограничения, особености и възможности за интерпретация на системата при приложение в тунелното строителство.

Представените в Раздел 6 резултати от изпълнението, наблюдението и анализа на пробен участък с дисперсно армирана облицовка разкриват особеностите на нейното поведение в реални инженерно-геоложки условия при прилагане на обсервационния метод.

Получените данни и направените изводи създават основа за разширяване на изследването в посока на въздействия, свързани със сеизмични натоварвания.

12.РАЗДЕЛ 7: ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ В ЗДРАВИ СКАЛНИ МАСИВИ. МЕТОДИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ

В раздел 7 са представени два взаимно алтернативни метода за проектиране на тунелни облицовки, първият съгласно изискванията на система от конструктивни еврокодове, и вторият по обсервационен метод за проектиране на Геотехнически конструкции, с прилагане на деформируеми крепежи в здрави скални масиви, състоящи се от скални анкери и дисперсно армиран пръскан бетон. Проектирането на тунелни облицовки в здрави скални масиви е предизвикателна задача поради факта, че този тип конструкции следва да бъдат проектирани така, че да удовлетворят едновременно две условия: за конструктивна сигурност - носеща способност и дълготрайност; за приложимост - ефективно и лесно изпълнимо решение за тунелната облицовка. Прилагането на тунелни облицовки от пръскан бетон с армировка, прътова или дисперсна, и скални анкери е най-разпространения метод за укрепване на подземни изработки - тунели и каверни. Представените методи и резултати в раздела следва да се разглеждат с внимание и не трябва да бъдат прилагани без допълнителен анализ за приложимост на решението. В тунелната практика съществуват и други методики и модели за проектиране на тунелни облицовки, съществено различаващи се от изискванията на системата от конструктивни Еврокодове [7.1] и [7.2] относно принципа на проектиране, но основаващи се на наблюдение и анализ (Observation method) на вече изпълнение тунели.

Тунелът/ каверната, включен в изследването, е част от подземна железопътна гара, разположена в град Гьотеборг, Швеция. Инженерно геоложките условия на разглежданата тунелна изработка се окачествяват съгласно Q-system (Barton) в диапазона от лоши до добри скални условия, с Q индекс от 1 до 4, в здрав скален масив с три основни пукнатинни системи.

Първоначалното проектно решение за разглеждания тунелен обект е разработено от експертен проектантски екип с участието на докторанта, при директно спазване на изискванията на Възложителя и на приложимите нормативни и технически изисквания. Предвидената първична тунелна облицовка включваше: пръскан бетон с обща дебелина над 250 mm, четириделна прътова стоманена армоферма, разположена през 1,5 m, двойна заварена армировъчна стоманена мрежа и системни скални анкери. С оглед на значителните размери на напречното сечение е приета поетапна последователност на изпълнение. Връзката между пръскания бетон и надлъжната монолитна греда е предвидена като корава - прехвърляща надлъжни и напречни сили, както и огъващи моменти от тунелната облицовка към монолитната греда. В участъка скалното покритие е ниско и с променлив размер, но не по-малко от 12,5 m, което е повече от половината на широчината на напречното сечение от стена до колонадата. За определяне на разрезните усилия в тунелната облицовка е съставен пространствен (триизмерен) модел по Метод на крайните елементи в програма за геотехнически конструкции Bentley Plaxis 3D.

След провеждане на изчисления за различните случаи на напрегнато състояние на масива и обобщаване на резултатите, са проведени оразмерителни проверки по метода на граничните състояния съгласно изискванията на Еврокод 2 [7.1] и [7.2]. Следва отново да се отбележи, че разпоредбите на Еврокод 2 не са разработени пряко за проектиране на тунелни облицовки, а в общия случай се отнасят до стоманобетонни конструкции при условия, различни от специфичното пространствено взаимодействие в системата „скален масив - облицовка“. Именно установяването на тези ограничения обуславя необходимостта от последващо разглеждане, анализиране и адаптиране на други изчислителни методи, насочени към постигане на проектни решения, които едновременно удовлетворяват изискванията за носеща способност, експлоатационна годност и конструктивна безопасност.

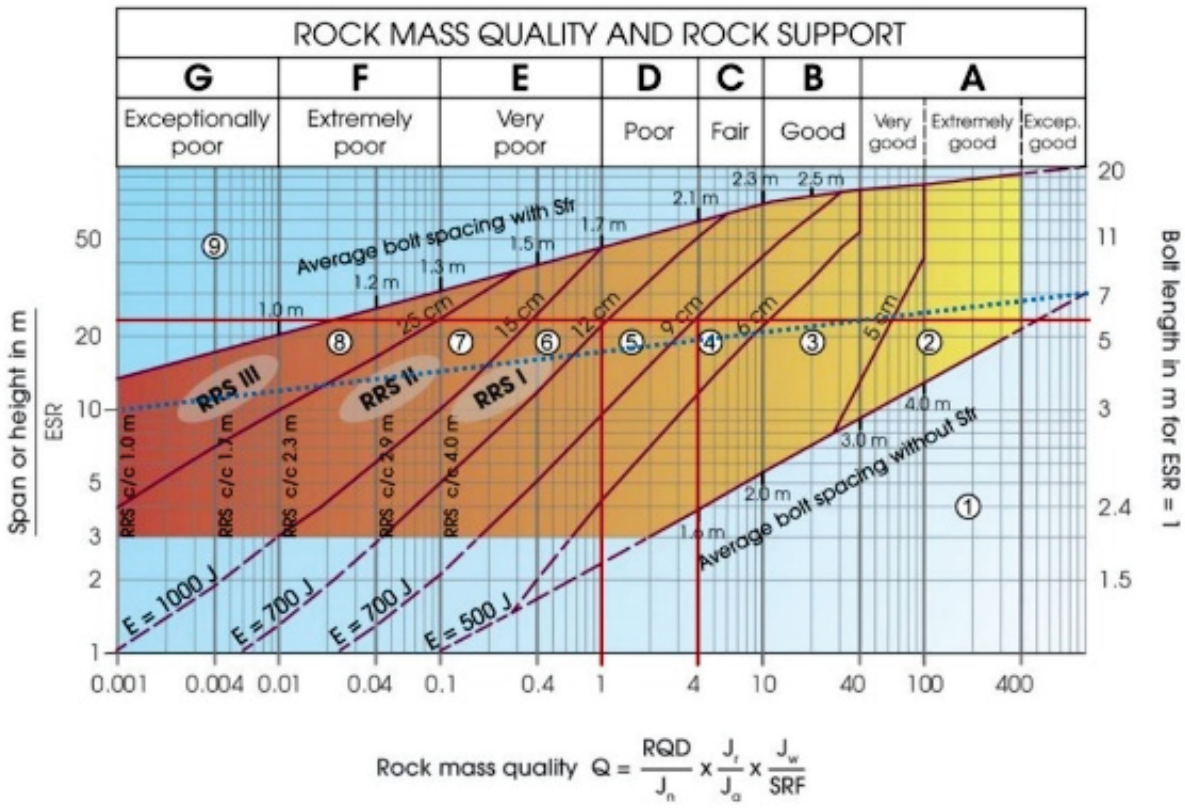
Неочакван и нелогичен резултат от триизмерния числен модел е реализирането в надлъжна посока на значителни и по-големи спрямо радиалните, разрезни усилия в конструкцията - основно значителни опънни усилия, но също така и множество локални концентрации на разрезните усилия. Получените резултати бяха оценени за достоверност на база опит при подобни обекти, като за обект аналог беше разгледан Gjøvik Olympic Cavern Hall, спрямо информацията представена в [7.6]. В резултат на сравнителният анализ беше идентифицирано, че в проекта за Gjøvik Olympic Cavern Hall, е приложено значително по-малко количество скални анкери и дисперсно армиран със стоманени фибри пръскан бетон, при по-големи размери на напречното сечение, приблизително еднакви условия и без наличието на колонада в средата на свода.

В основата на съставянето на новото проектно решение е оценка на възможните механизми на разрушение и преоценка кой е основният носещ елемент. За новото проектно решение е оценено, че механизъм на разрушение би настъпил от образуването на скален клин в свода на тунела, задвижван от гравитационната сила. За да се докаже, че със съставения набор от мерки за тунелен крепеж може да се постигне стабилността на скалният масив, бяха проведени следните анализи:

- Емпиричен анализ за определяне на необходимите мерки за скален крепеж. Анализа е проведен съгласно [7.4].
- Анализ за определяне дебелината на дисперсно армиран със стоманени структурни фибри пръскан бетон.
- Числен анализ - с числено моделиране за стабилност на скалната маса, скална армировка.
- Локален блоков анализ за стабилност на скални блокове по метод на граничното равновесие.
- Определяне на граничните стойности за преместванията, въз основа на численият анализ.

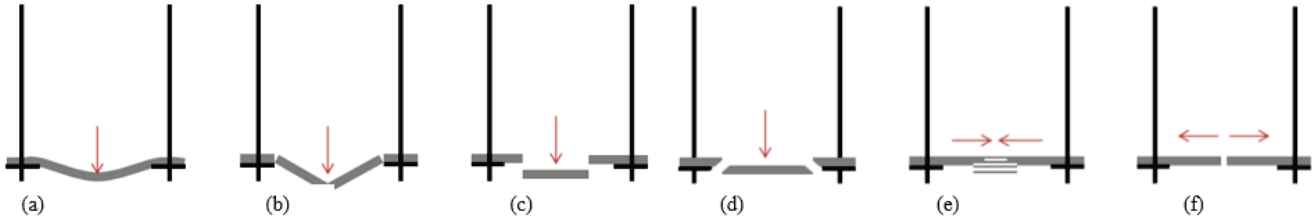
Проведен е емпиричен анализ съгласно [7.4], където основано на опита от прилагането може да се посочи, че с използването на NGI Q-system [7.4] получаваните решения са по-консервативни, в сравнение с аналитичните решения/методи, което пък означава, че в NGI Q-system [7.4] има вградена сигурност, например за вариации в качеството на изпълнение. С вертикални червени линии на фигура 15 е представен интервала на очакваните скални условия, като с червена хоризонтална линия е нанесена проектната широчина на тунела 22,5 m, представляваща 50% от реалната, поради наличието на централна колонада от монолитни стоманобетонни колони, предвидена да поема и планински натиск. Може да се посочи, че дебелините на пръскания бетон t ≤120 mm са значително по-малки, спрямо първоначалното решение t= 250 mm, при еднаква дължина и разпределение на скалните анкери. При условия Q=1, е необходимо приложение допълнително на ребра от пръскан бетон с дебелина 400 mm, с два реда, с по 6 броя армировъчни пръти с диаметър 16 и 20 mm. Ребрата се изпълняват през разстояние от 4,0 m.

Поради технологични обстоятелства се състави адаптирано решение, консервативно определено за скален крепеж, приложим изцяло в очаквания диапазон на скални условия.



Фиг. 15. Емпирична диаграма за скален крепеж с интервали според очакваните скални условия [7.4]

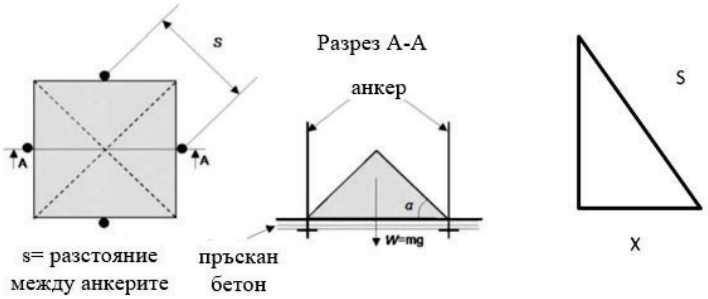
Проведен е анализ на дисперсно армирания пръскан бетон, съгласно [7.7], като са разгледани шест възможни модела на разрушение на пръскан бетон, прилаган за тунелен крепеж в здрав, блоково - напукан скален масив: адхезия, огъване, срязване, продънване, натиск, опън.



Фиг. 16. Модели на разрушаване на пръскан бетон [7.7]

Наблюденията за падащи скални клинове показват, че нарушенията в пръсканият бетон настъпва от недостатъчна адхезия (a), огъване (b), срязване (c), продънване (d), натиск (e) и опън (f). Резултатите от проведените емпирични анализи потвърждават, че определеното решение с прилагането на системен анкерен крепеж, през разстояние 1,5 m, в двете посоки и дисперсно армиран пръскан бетон с дебелина 15 cm, е достатъчно да се предотврати образуването на вторични клинове, разположени между скалните анкери.

Първата проверка е за достатъчност на адхезията между дисперсно армирания пръскан бетон и скалния масив, при наличие на добра адхезия между дисперсно армирания пръскан бетон и скалния масив. След дефиниране на изчислителната схема на скалния клин и използваните зависимости, в Таблица 5 са обобщени числовите стойности на параметрите, участващи в проверката.



Фиг. 17. Скален клин образуващ се между скалните анкери, част от системният анкерен крепеж, натоварващ дисперсно армираният пръскан бетон

Таблица 5. Ширина на поемане на натоварването, съгласно [7.9]

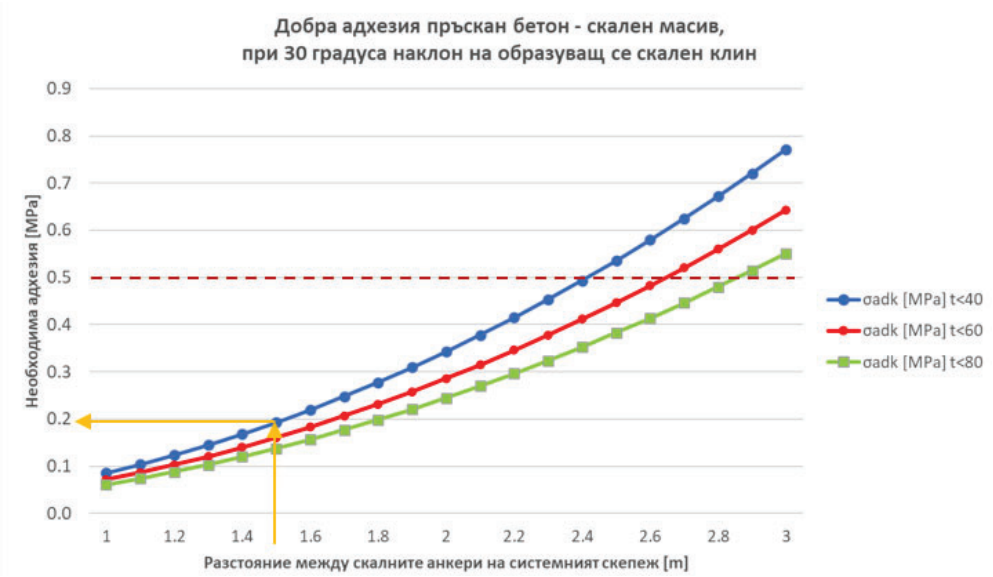
Дебелина на пръскания бетон t_c, mm	**Ширината на поемане на натоварването** $\delta_m, mm/m$
40	25
60	30
80	35

Ширината на поемане на натоварването, δ_m, е функция на дебелината на пръскания бетон, t_c, съгласно таблица 5.

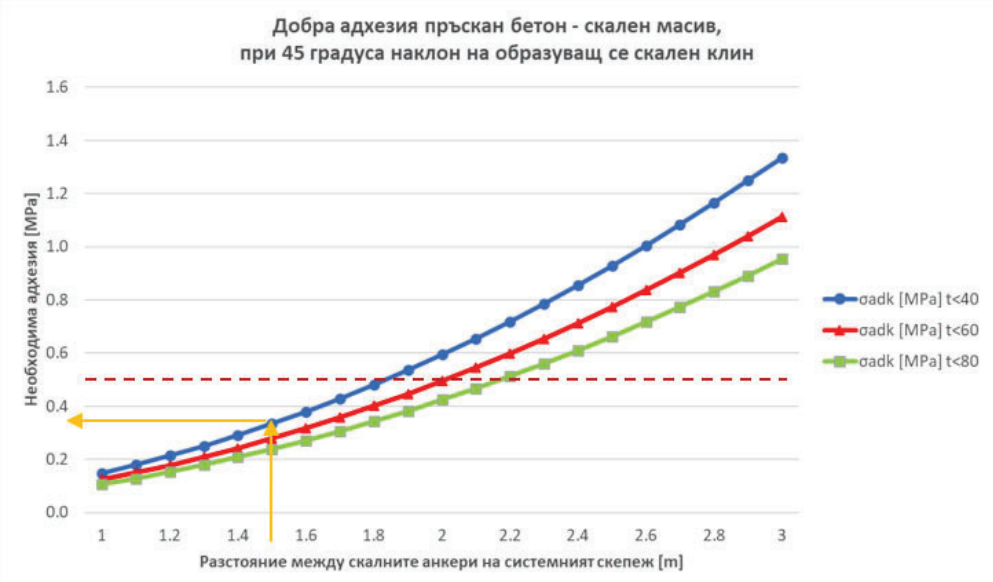
Анализът се провежда при редица предпоставки относно: характеристичната якост на сцепление, големината на натоварване. За добра адхезия се счита якост на сцепление със стойност по-висока от 0,5 MPa (здрав скален масив).

Втората проверка се провежда за случай на лошо сцепление или при силно напукан скален масив, при които условия може да се предположи, че дисперсно армираният бетон поема въздействията чрез огъване, и пръсканият бетон е закрепен към масива със скални анкери.

Капацитетът за поемане на огъващи моменти от дисперсно армирания пръскан бетон се определя от якостта на опън при огъване.



Фиг. 18. Нарушаване на адхезията в пръскания бетон, поради разхлабен скален блок с ъгъл 30 градуса, при добри условия на сцепление.
Червената пунктирана линия определя силата на адхезия в контакта бетон - скала (0,5 MPa).



Фиг. 19. Нарушаване на адхезията в пръскания бетон, поради разхлабен скален блок с ъгъл 45 градуса, при добри условия на сцепление.
Червената пунктирана линия определя силата на адхезия в контакта бетон - скала (0,5 MPa).

Уравнения (22) и (23) описват последователността при оценката на адхезионната устойчивост на пръскания бетон към скалния масив.

$$M_d \leq \frac{f_{flcrk}.t_c^2}{\gamma_C.6} \rightarrow t_c = \sqrt{\frac{M_d.\gamma_C.6}{f_{flcrk}}} \tag{22}$$

$$M_d = M_k.\gamma_d.\gamma_{G;dst} \tag{23}$$

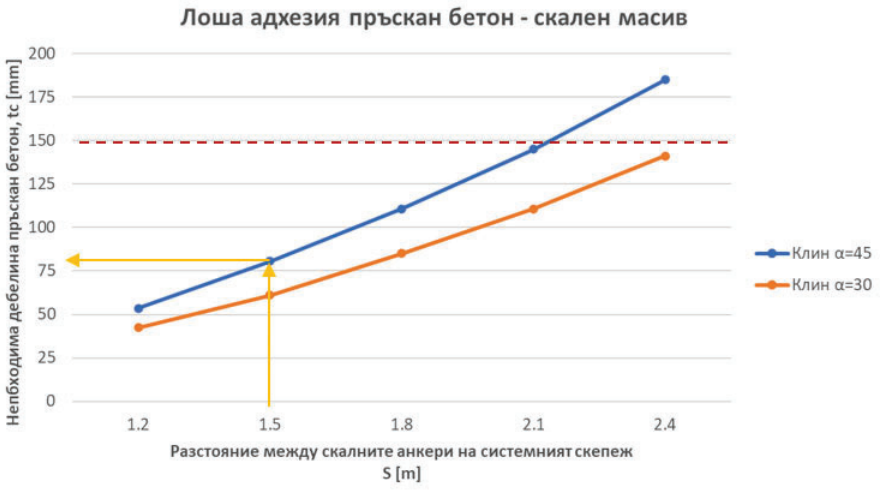
Където:

f_{flcrk} - характеристична стойност на якостта на опън на бетона до образуването на първа пукнатина

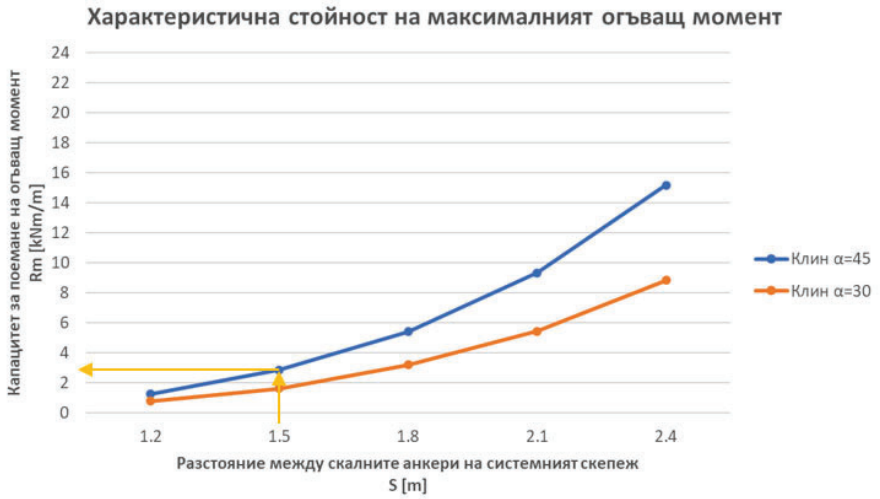
t_c - дебелина на дисперсно армираният пръскан бетон

M_d - оразмерителен огъващ момент

Размерът на максималния оразмерителен огъващ момент зависи от размера на разхлабената зона, натоварваща облицовката между анкерите. За определяне на резултата от анализа е определена характеристичната стойност на огъващият момент, при различни разстояния между скалните анкери и размера на разхлабената зона, под два ъгъла - 30 и 45 градуса.



Фиг. 20. Необходима дебелина за предотвратяване на повреда от огъване, при лоша адхезия (0 MPa). Червената пунктирана линия определя проектната дебелина на пръскания бетон.



Фиг. 21. Характеристична стойност на максималния огъващ момент, при лоша адхезия

Третата проверка е за да се провери достатъчността на сечението срещу продънване на пирамидален скален клин, образуващ се между скалните анкери, съгласно [7.8]. С уравнение (24) се определя изчислителен параметър - дебелина на пръсканият бетон, необходим за количественото характеризиране на взаимодействието между пръскания бетон и скалния масив, а с уравнение (25) се извършва крайната оценка на носещата способност или на граничното състояние на системата.

$$W_d \leq \frac{\tau_{bk}.t_c.O_m}{\gamma_C} \rightarrow t_c = \frac{W_d.\gamma_C}{\tau_{bk}.O_m} \quad (24)$$

$$W_d = W_k.\gamma_d.\gamma_{G;dst} \quad (25)$$

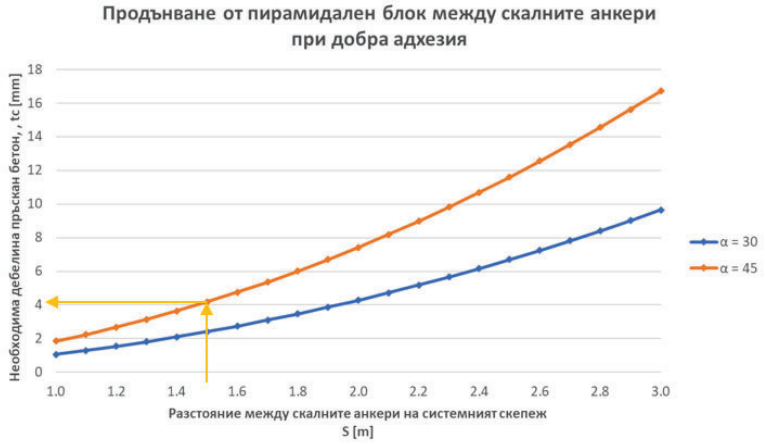
Където:

τ_{bk} - Характерна якост на срязване на пръскан бетон

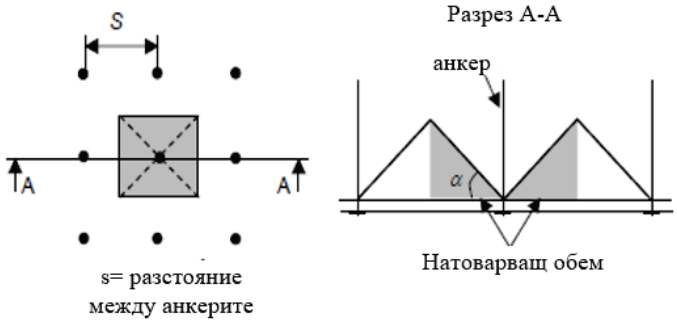
O_m - Периметърът на носещата повърхност между пръскан бетон и скала

Последната четвърта проверка е за продънване през опорните плочи на анкерите, при условията на лошо сцепление, съгласно [7.8].

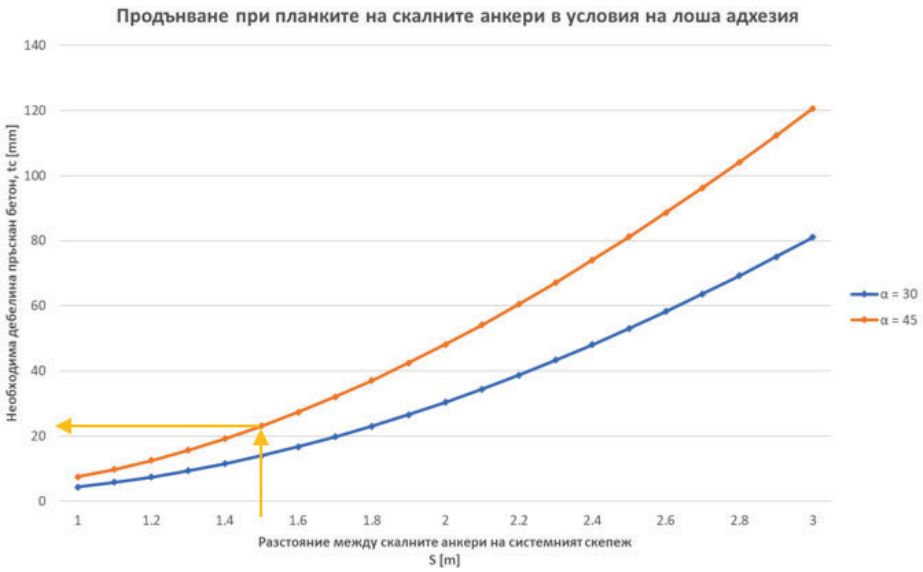
За целите на проверката се съставя диаграма (фигура 23) за необходимата дебелина на пръсканият бетон, във функция на различни разстояния между скалните анкери и при натоварвания от скален клин, образуващ се по ъгъл 30 или 45 градуса.



Фиг. 21. Необходима дебелина за предотвратяване на продънване от пирамидален блок между скалните анкери, при добра адхезия



Фиг. 22. Натоварване върху анкерната плоча



Фиг. 23. Необходима дебелина за предотвратяване на продънване при планките на скалните анкери, при лоша адхезия

Уравнение (26) представя проверка на носещата способност на разглеждания елемент от системата „пръскан бетон - скален масив“, като чрез него се оценява дали облицовката или контактната зона бетон - скала могат да поемат приложеното натоварване без достигане на гранично състояние.

$$W_d \leq \frac{\tau_{bk}.\pi.t_c.(2b+t_c)}{\gamma_C} \quad (26)$$

Направена е проверка за гравитационно натоварен свод, тъй като при ниско скално покритие, и когато скалният масив няма носеща способност да поеме възникващите усилия и засводи, в следствие изпълнението на тунел, или при ниска якост на скалния масив е необходимо дисперсно армираният пръскан бетон да поеме изцяло планинският натиск. Следните зависимости, посочени в [7.11] и [7.12] могат да бъдат използвани за първоначално определяне на необходимата дебелина на пръсканият бетон - уравнения от (27) до (31) представят зависимости за първоначално определяне на необходимата дебелина на пръскания бетон при гравитационно натоварен свод.

$$t_c = \frac{2.B.q}{6.3.f_{cd}}.\sqrt{1+\frac{B^2}{10.f^2}} \quad (27)$$

$$t_c = \frac{B^2.q}{9.f.f_{cd}} \quad (28)$$

Уравнение (27) се прилага при синусоидално/променливо натоварване върху свода, уравнение (28) при равномерно натоварване в свода.

$$t_c = \frac{B.q}{2.f_{cd}}.\sqrt{1+\left(\frac{\mathrm{B}}{4.\mathrm{f}}\right)^2} \quad (29)$$

Уравнение (29) представлява необходимата дебелина в началото на свода. След прилагането на частните коефициенти за сигурност за материала и въздействието, както и определянето на въздействието, уравненията (27) и (28) се преобразуват в:

$$t_c = \frac{2.B.W_k.\gamma_d.\gamma_{G;dst}}{6.3.\left(\frac{f_{ck}}{\gamma_k}.\alpha_{cc}\right)}.\sqrt{1+\frac{B^2}{10.f^2}} \quad (30)$$

$$t_c = \frac{B.W_k.\gamma_d.\gamma_{G;dst}}{2.\left(\frac{f_{ck}}{\gamma_k}.\alpha_{cc}\right)}.\sqrt{1+\left(\frac{\mathrm{B}}{4.\mathrm{f}}\right)^2} \quad (31)$$

Където:

t_c - дебелината на пръсканият бетон

f- височина на свода на обрушване, определен съгласно уравнения (32) и (33).

f_{cd} - проектна якост на натиск на бетона

f_{ck} - характеристична якост на натиск на бетона

γ_C - частен коефициент за носеща способност на пръскания бетон, съгласно [7.1]

γ_d - коефициент на сигурност

$\gamma_{G;dst}$ - частен коефициент за натоварването, съгласно [7.3]

B - широчина на тунелния профил

W_k - характеристична стойност на въздействието от скалният масив, може да бъде определена като произведение на обема и обемната плътност на скалният масив за един метър дължина.

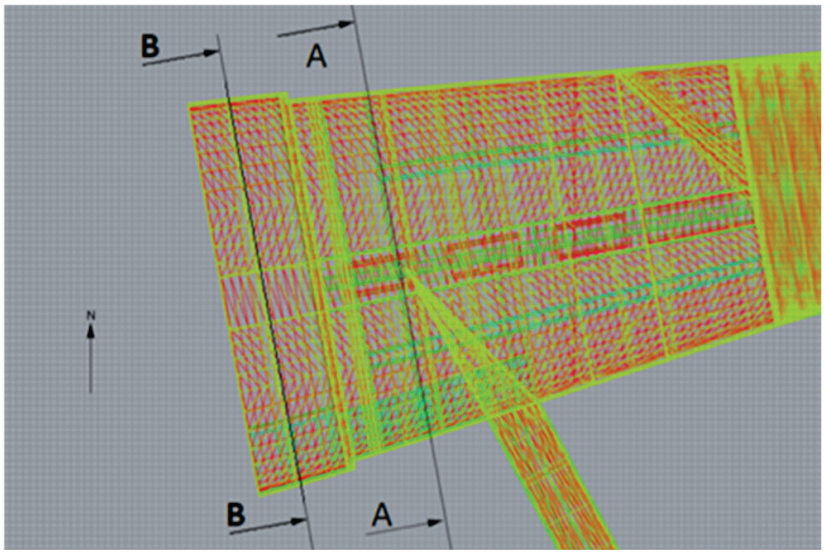
Височината на свода на обрушване над тунелния профил може да бъде определен по класическа геотехническа теория, уравнение (32) или по модифициран метод представен в [7.13] с уравнение (33).

$$f = \frac{B}{2}.tg\left(45-\frac{\varphi}{2}\right) \quad (32)$$

$$f = B.\sqrt{\frac{q_v}{8.q_h}} \quad (33)$$

q_v, q_h - стойност на вертикалното, съответно хоризонталното въздействие от планински натиск съответстващо на измерените и получените стойности в перпендикулярно на тунелната ос направление.

Достатъчността на скалният крепеж и стабилността на тунела са анализирани със специализиран софтуер за двуизмерен числен анализ UDEC/ Itasca, в две характерни за тунела местоположения - стандартно сечение и при най-ниско скално покритие (12,5 m).

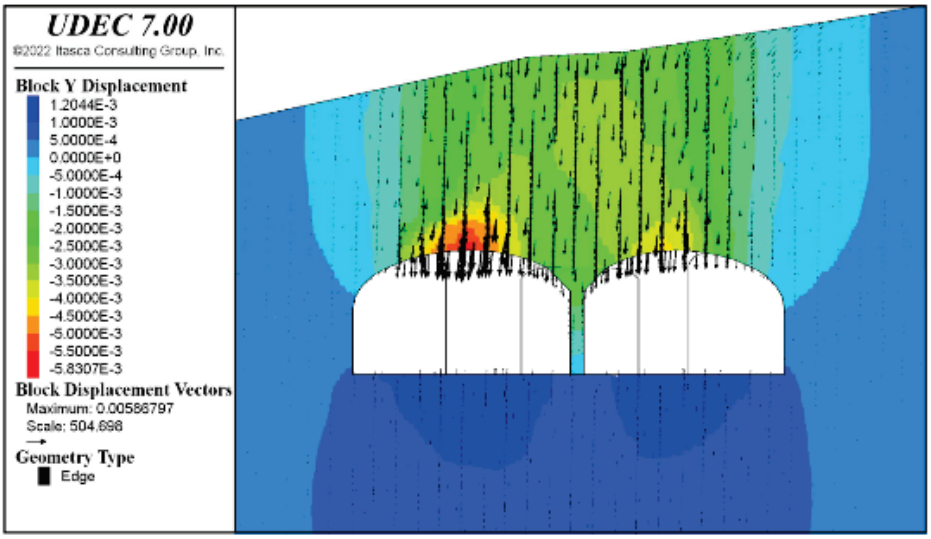


Фиг. 24. Ситуационно разположение на разглежданите сечения

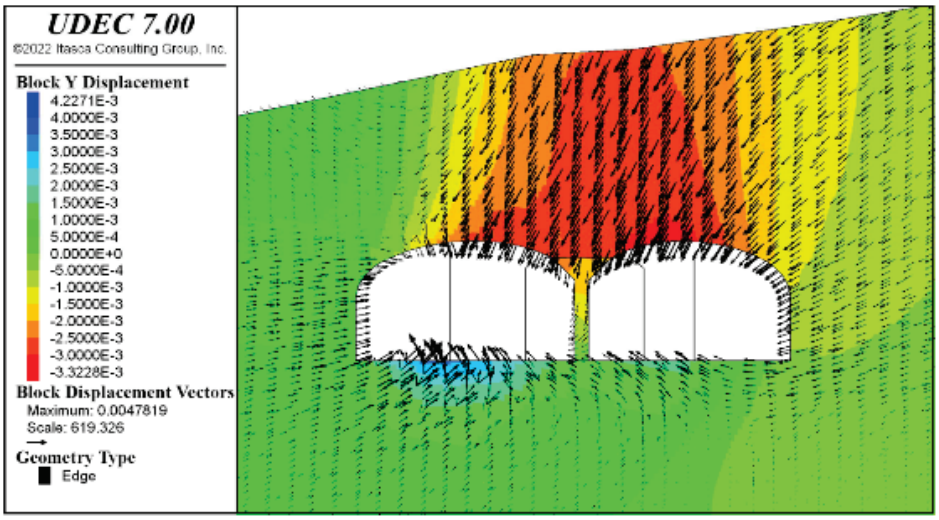
UDEC е двумерна числена програма, базирана на метода на дискретните елементи (МДЕ). Определените от анализа преместванията в свода на тунелния профил достигат стойност 9,3 mm. Усилията в скалните анкери не надвишават 130 kN и са в рамките на допустимите, съгласно избраният тип пасивен анкер с котва и епоксидно антикорозионно покритие (PC bolt M27) - 214 kN. Допълнително са анализирани и преместванията, хлъзгане и отваряне на пукнатините в масива. Максималните премествания са хлъзгане до 5mm, а максимална стойност за отваряне на пукнатините са до 2,7 mm, и двете реализиращи се в отделни, локални участъци около тунела.

В резултат на проведените анализи и изведените резултати и за двете сечения по метода на дискретните елементи може да се посочи, че сеченията са стабилни, когато подбраният брой анкери, разпределение и дължина на скалните анкери е достатъчен за реализирането на новото равновесно състояние в масива.

За проследяване на механизма на разрушение настъпващ от образуването на скален клин в свода на тунела е извършен блоков анализ за образуване на скални клинове, по метода на гранично равновесие. Анализът е проведен със софтуер Rocscience UnWedge, позволяващ анализи на подземни тунелни изкопи с пресичащи се пукнатинни системи.



Фиг. 25. Резултати от анализ за сечение А-А. Вертикални премествания в скалния масив при гравитационно напрегнато състояние (ляво)



Фиг. 26. Резултати от анализ за сечение А-А. Вертикални премествания в скалния масив при хоризонтално напрегнато състояние

Тунелният профил е анализиран с три отделни модела: Ляв тунел - частта в ляво от колонадата, Десен тунел - частта в дясно от колонадата и пълен профил, без колонадата в средата. Скалната армировка (скалните анкери) са моделирани със своята проектна носеща способност на опън и сръзване.

$$F_{yd} = \frac{F_{yk}}{\gamma_s} = \frac{246}{1{,}15} = 214\ kN \tag{34}$$

Където:

F_{yd} - Проектна якост на опън на стоманата на скалният анкер;

F_{yk} - Характеристична якост на стоманата на скалният анкер;

γ_s - Частен коефициент на сигурност за стоманата;

Носещата способност на сръзване за скален анкер е определена съгласно [7.14]. Уравнение (35) представя зависимост за определяне на носещата способност на сръзване на скалния анкер, използвана в блоковия анализ при оценката на устойчивостта на скалните клинове, като се отчита влиянието на геометричните и якостните характеристики на анкера, както и условията по повърхнината на прекъсване, включително ъгъла на триене в пукнатината и ориентацията на анкера спрямо равнината на сръзване:

$$B \geq \frac{\sigma_s.d^2.\pi}{4}(\mu.sin\alpha + cos\alpha) = \frac{500000.0{,}025^2.\pi}{4}(tan30.sin90 + cos90) = 141{,}7\ kN \tag{35}$$

Където:

B - Максималната характеристична сила в скалният анкер;

μ - "коефициент за сръзване", при кохезия 0 kPa е определен на $\mu = tan\theta$;

θ- ъгъл на триене в пукнатината. Прието 30 градуса;

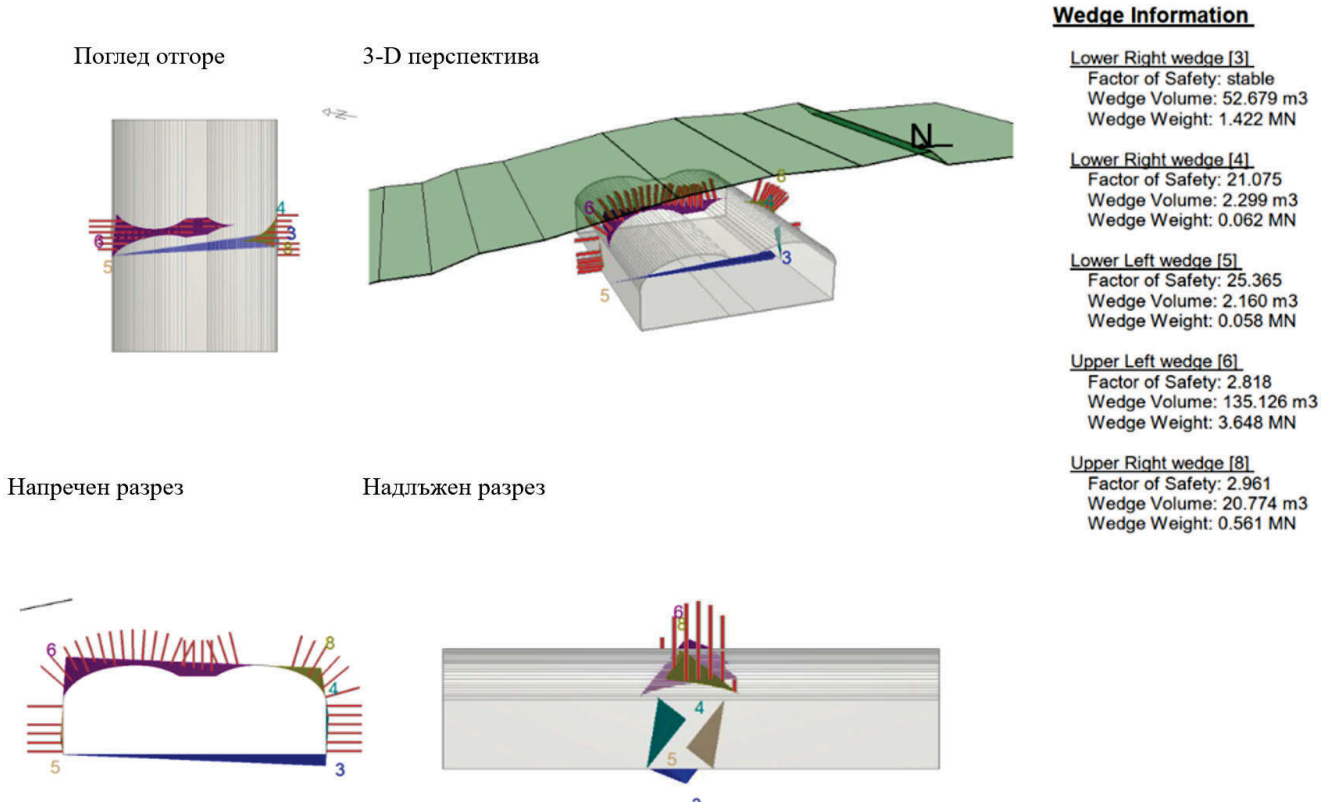
σ_s - Характеристична якост на опън на стоманата;

d - Диаметър на анкера;

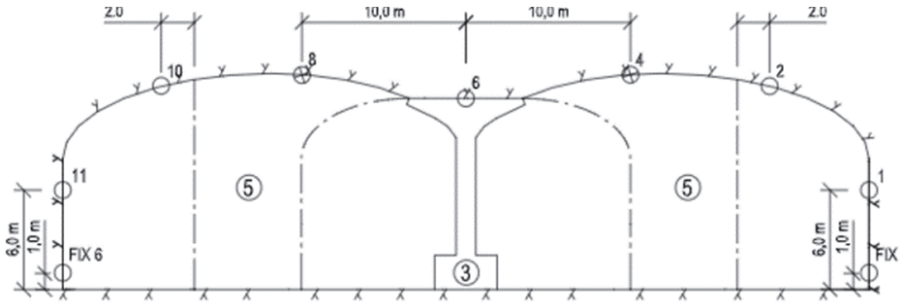
α - Ъгъл на анкера спрямо равнината - повърхността на прекъсване. При 90 градуса е механизъм на чисто сръзване.

Освен стандартния анализ, е проведен и вероятностен анализ за чувствителността на решението на вариация/отклонение на входните данни за ориентацията на пукнатинните системи - наклон и направление.

По време на изпълнение на тунелите следва да се наблюдават и анализират задълбочено резултатите от реализираните премествания и конвергенцията.



Фиг. 26. Резултати от блоков анализ за пълен профил, без колони.



Фиг. 27. Точки за наблюдение, по тунелният профил

Таблица 6. Гранични нива за преместванията

Участък	Вид на деформацията и участък	Очаквана стойност на деформацията (mm)	Алармено ниво 1 (mm)	Алармено ниво 2 (mm)	Алармено ниво 3 (mm)
Основно сечение	Вертикална Хоризонтална	5,8 2,2	4 2	5 3	7 4
При ниско скално покритие	Вертикална Хоризонтална	9,4 2,6	6 2	9 3	12 4

Със съставянето на новото проектно решение са реализирани следните резултати:

- Не се налага запълването на надработки, допуснати при пробивно взривните работи, поради липсата на стоманени армоферми, изискващи строго спазване на тунелния контур съгласно теоретичния профил, което позволява бързо изпълнение и постигане на устойчиво решение от екологична точка.
- Не се налага прилагането на прътова армировка, стоманени армоферми, заварени стоманени армо-мрежи. Това води до прости технологични и циклични операции за полагане на тунелният крепеж, което е съществено предимство, спрямо началното решение.

- Конструктивната дебелината на дисперсно армираната облицовка - пръскан бетон със стоманени фибри беше редуцирана повече от два пъти.

При проектирането на подземни съоръжения, анализът следва да започва с идентифициране на възможните механизми за повреда и за авария. Често спрямо този анализ може да се наложи провеждането на допълнителни проверки или използване на напълно алтернативни на общо приетите методи. Не винаги е възможно геотехническите конструкции да бъдат проектирани изцяло съгласно нормативните изисквания, съставени за сгради и мостове. Има специфични аспекти - като взаимното действие на масив - конструкция, както и други фактори, неотчетени в първите части на Еврокод (приложими за сгради и мостове). Прилагането на нормативни документи като Еврокод 2, следва да става след оценка на получаваното решение, особено при скални масиви.

Използването на огромния набор от програмни продукти следва да се контролира и оценява спрямо поставената задача и геотехническите условия. Калибриране на модела (например съпоставяне на получени резултати с такива определени на база наблюдения от подобни съоръжения при приблизително еднакви условия и последващ мониторинг при изпълнение) следва да се разглежда като нормална практика и трябва да се прилага след анализ на риска, както и от експерти с опит от изпълнение на подобни обекти.

Резултатите следва да бъдат оценявани за достоверност и при необходимост допълнително проверени с други налични методи. Моделите на почвения масив, метода за моделиране, вида на „нарушенията в масива“, включени в анализа могат да доведат до нелогични резултати, значително надхвърлящи възможните или недооценяващи определени параметри - например настъпващите деформации. Коравите конструкции, приложени в модели с голяма коравина често водят до значително преоразмеряване на тунелните съоръжения, като това може да ги направи неизгодни, неизпълними или много опасни за изпълнение, поради сложни технологични процеси и работни операции в опасна среда - неукрепен масив например, както и работа на височина. Прилагането на стоманобетонни конструкции за тунелни облицовки следва да се прилага след анализ за ефекта и целесъобразността от това решение.

За прилагане на представения метод за дисперсно армирани тунелни облицовки е съществено анкерните плочи да бъдат поставени върху последния носещ пласт пръскан бетон, което изискване често е игнорирано при изпълнение. По време на изпълнение е важен и мониторинга на настъпващите премествания и периодичната оценка дали те са съгласно прогнозираните стойности в проекта.

Проведеното изследване в рамките на раздел 7 е основание да се приеме, че поставените цели и задачи са изпълнени в необходимия обхват, като е разработено и обосновано приложимо решение за дисперсно армирана тунелна облицовка, съобразено с конкретните инженерно-геоложки условия.

Раздел 6 и Раздел 7 изпълняват функцията на последователна схема за проверка на разработените в дисертационния труд зависимости, като в първия случай проверката е осъществена в аналитично-оразмерителен аспект, а във втория - в практически приложен план, чрез наблюдение и анализ на поведението на тунелната облицовка в реални инженерно-геоложки и строително-технологични условия.

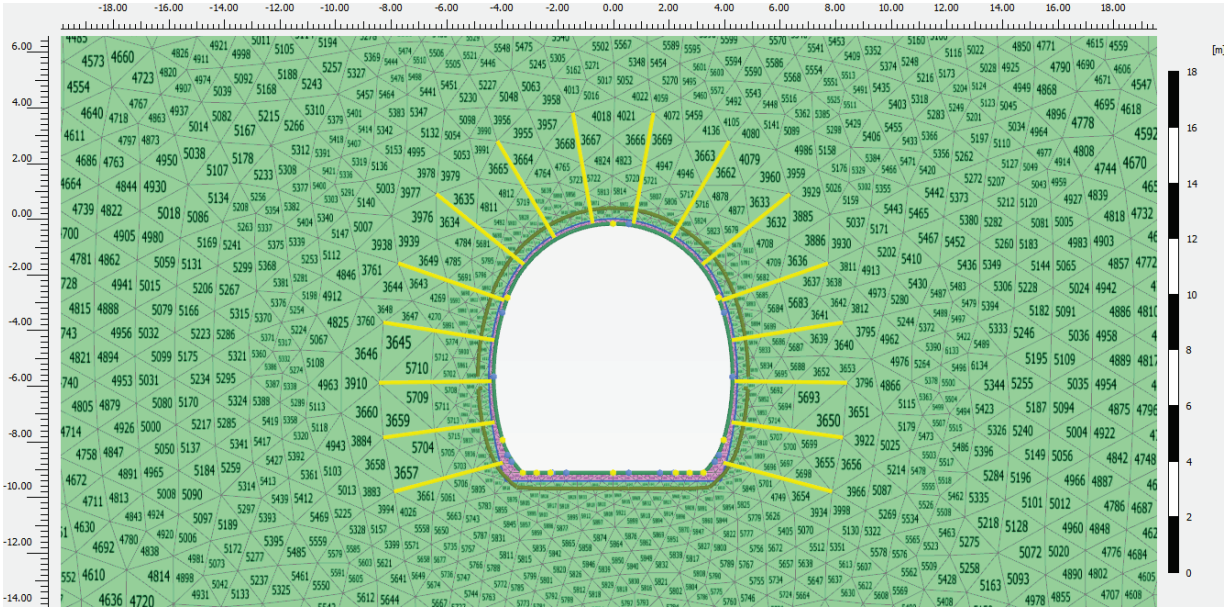
С това обаче изследването не може да се счита за завършено, тъй като цялостната инженерна оценка на тунелната облицовка изисква тя да бъде разгледана не само при статични въздействия, но и при динамични натоварвания, породени от сеизмични въздействия. В този смисъл, в следващия раздел 8 дисертацията разглежда оценка на поведението на дисперсно армирани тунелни облицовки при сеизмично въздействие, като се преминава към последователна изследователска, аналитична и числена процедура, основана на теоретично дефиниране на характера на земетръсното въздействие, анализ на механизмите на повреда в подземните конструкции и числено моделиране на взаимодействието в системата „тунелна облицовка - скален масив“, включително с отчитане влиянието на ставите в облицовката и условието за развитие на пластични зони.

13.РАЗДЕЛ 8: СЕИЗМИЧНО ПОВЕДЕНИЕ НА ДИСПЕРСНО АРМИРАНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ

Раздел 8 е посветен на анализа на поведението на тунелната облицовка при земетръсно въздействие, като неговото значение надхвърля рамките на частен изчислителен случай. В Раздел 8 е приложена последователна изследователска, аналитична и числена процедура за оценка на поведението на тунелната облицовка при сеизмично въздействие. В заключителната фаза на раздел 8 са анализирани резултатите от численото моделиране, чрез проследяване на вътрешните усилия, преместванията, контактните напрежения и развитието на пластични стави.

Съставен е числен модел по метод на крайните елементи, за непрекъсната среда. Численият модел е с размери 100 m широчина и 100 m височина и се състои от 7 000 триъгълни крайни елемента и 57 000 възела. В модела са включени следните етапи:

- Генериране на първоначално напрегнато състояние на масива.
- Изкоп за тунел в калота, с релаксация на 50% от напреженията в масива.
- Изпълнение на системни анкери и дисперсно армиран пръскан бетон по стени и свод.
- Изкоп за тунел в щрос, с релаксация на 50% от напреженията в масива.
- Изпълнение на системни скални анкери и дисперсно армиран пръскан бетон по стени.
- Изпълнение на вторична облицовка с хидроизолация.
- Сеизмично въздействие - псевдостатичен анализ при PGA = 2,3 m/s^2 [8.7].



Фиг. 28. Мрежа от крайни елементи около тунела (модел МКЕ)

Уравнения (36) и (37) дефинират приетите хоризонтална и вертикална компонента на сеизмичното въздействие, въведени в модела в рамките на псевдостатичния анализ при PGA = 2,3 m/s².

Параметри на въздействието:

$$k_x = 0{,}7.a_g = 0{,}161 \tag{36}$$

$$k_y = 0{,}5.k_x = 0{,}081 \tag{37}$$

Където:

k_x- хоризонтална компонента на сеизмичното въздействие;

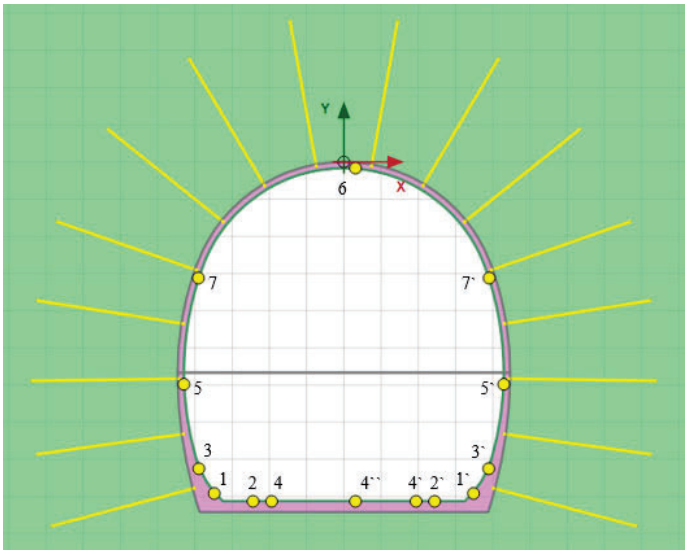
k_z - вертикална компонента на сеизмичното въздействие;

$a_g = \frac{PGA}{g} = 0{,}23$ - изчислително ускорение на земната основа тип А [8.7].

Главният параметър на коравина на земната основа при натоварване от земетръс е модулът на срязване G.

Поради целите на анализа, оценка на ефекта от развитие на стави в облицовката, коефициентът за поведение - дуктилност е приет 1,0.

- При настъпване на сеизмичното въздействие в тунелната облицовка настъпва последователно образуване на пластични стави.



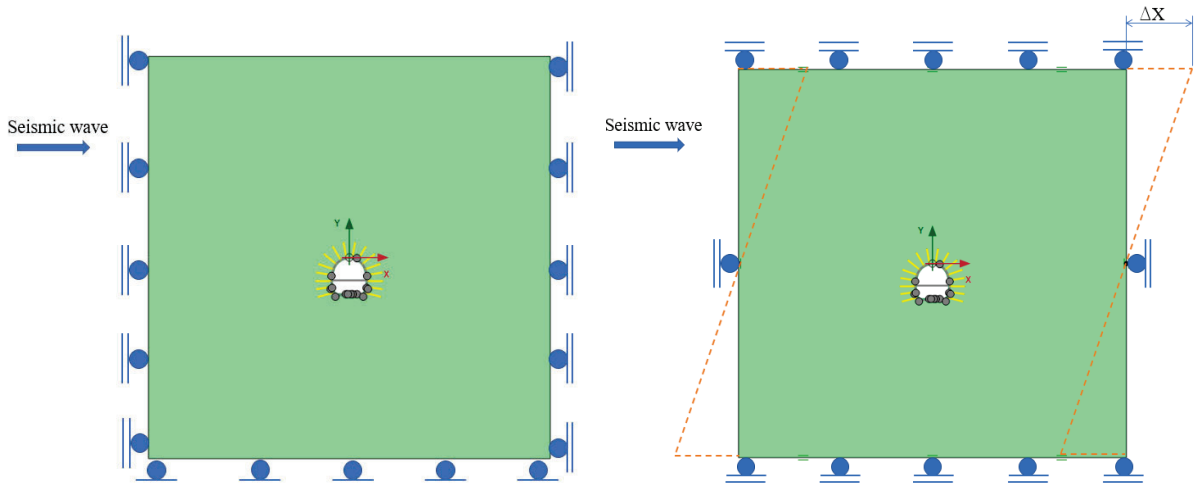
Фиг. 29. Последователност на образуване на пластични стави във вторичната облицовка

Прието е първоначално да се образуват пластични стави 1/1'. При продължаващо сеизмично въздействие се образуват последователно допълнителни стави 2/2', 3/3', 4/4', 4'', 5/5', 6, 7/7'. В резултат от анализа в отделните етапи са получени напреженията и деформациите в скалния масив, разрезните усилия и премествания в тунелната облицовка, усилията в скалните анкери и контактните напрежения.

Съставени са модели, описващи следните вариации в условията:

Параметър А - образуване на става/и. Всички модели са изчислени първоначално без става, след което са анализирани 7 допълнителни етапа с постепенно нарастване на броя ротационни стави в модела. Показателят е означен с „А".

Параметър В - гранични условия на масива.



Фиг. 30. Гранични условия в скалния масив

В изследването са разгледани два характерни варианта на гранични условия: модел „R", при който по вертикалните контури са ограничени хоризонталните премествания, и модел „F", при който ограничението е въведено само в средната точка на вертикалния контур.

Параметър С - съвместно действие на първичната и вторичната облицовка. С „S" е означен модел с отчитане на хидроизолационната мембрана. С „С" е означено композитното действие на първична и вторична облицовка, например при използване на пръскани хидроизолационни системи.

Параметър D - Еластичен модул на дисперсно армиран бетон. С „E“ е означен Еластичен модул съгласно [8.15]. С „L” е означен редуциран еластичен модул, съгласно клауза 4.3.1 (7) на [8.7] и съгласно [8.16].

Таблица 7. Комбинации на вариациите

Комбинация номер	Параметър означение				Код на комбинацията
	A	B	C	D	
1	A	R	S	E	A-R-S-E
2	A	R	S	L	A-R-S-L
3	A	R	C	E	A-R-C-E
4	A	R	C	L	A-R-C-L
5	A	F	S	E	A-F-S-E
6	A	F	S	L	A-F-S-L
7	A	F	C	E	A-F-C-E
8	A	F	C	L	A-F-C-L

От направения преглед на настъпили нарушения при сеизмични въздействия в тунелни облицовки и спрямо резултатите за местоположението на реализиращите се максимални огъващи моменти, се пристъпи към последователно въвеждане на стави в модела, за справка фигура 29. Резултатите от анализа са представени в дисертацията в графичен вид, с максимална и минимална стойност, определени за цялото сечение, съответно за: надлъжна сила, огъващи моменти, срязващи/напречни сили, премествания и напрежения в контактния масив. Представени са кривите от отделните комбинации на вариациите в моделните условия съгласно таблица 7. В легендата към фигурите са изведени кодовете на комбинациите.

Разрезните усилия в тунелната облицовка първоначално нарастват при сеизмично въздействие, като след започване на образуване на стави в облицовката, усилията започват да намаляват своя интензитет. След реализирането на втора/ трета става, в тунелната облицовка не се констатира последващо изменение на разрезните усилия. След първоначално настъпващите премествания от сеизмично въздействие, не се наблюдава увеличаване, както в хоризонтално, така и във вертикално направление. Спрямо този резултат може да се констатира, че стабилността на тунелната облицовка е непроменена при последващо развитие на стави в облицовката, за разглеждания модел и при приетите условия.

За да бъде напълно осигурено това условие, следва да са приложени мерки за стабилното поведение на масива, да не се реализират локални блокове и локални зони на претоварване на облицовката.

Най-големите контактни напрежения възникват при дънната плоча и бързо намаляват в стените. При сеизмичното въздействие, напреженията се увеличават значително до стойности до 0,5 MPa натиск.

След проведен анализ на резултатите следва да се посочи, че тунелните облицовки имат добро дуктилно поведение с голям капацитет за поемане на сеизмично въздействие.

При образуването на стави в облицовката - Параметър А, не се наблюдава критична промяна на напрегнатото състояние на облицовката. Надлъжните сили (натиск) се увеличават значително при сеизмичното въздействие, което е очаквано явление. При огъващите моменти се наблюдава повишение на максималната стойност при образуването на първа става, и променяне на знака, т.е. страната на опънати нишки. Относно огъващите моменти важно предимство на дисперсно армираните тунелни облицовки е, че те имат еквивалентен капацитет за положителни (огъващи вътрешни нишки) или отрицателни огъващи моменти (огъващи външни нишки), „+“.

Срязващите сили се увеличават значително при сеизмично въздействие с ясно изразен пик при връзката дънна плоча - стени, което се дължи на геометрията на облицовката, а именно - малък радиус на свързване между дънна плоча и облицовка.

Деформациите, настъпващи в тунелната облицовка не се променят при реализирането на стави и не се образуват механизми в конструкцията, което е характерно за системи със значителна статическа степен на неопределеност.

Контактните напрежения, нормални и тангенциални, се повишат постепенно при сеизмично въздействие и образуване на стави, до момента в който се образува втора става, където достигат двойно по-висока стойност от началната, след което не променят интензитета си.

Методът на моделиране на граничните условия за масива - ограничаване на хоризонтални премествания, оказва незначително влияние на наблюдаваните показатели и резултати. Това се дължи основно на дълбоко заложения тунел и спазването на изискванията за ограничаване на краеви ефект - 5 пъти размера на тунела до границите на модела.

Съвместното действие на първичната и вторичната облицовка има съществено влияние върху резултатите. Реализират се значително по-високи локални концентрации при разглеждането на облицовките като разделени от хидроизолационната система, без опънни връзки. При тангенциалните напрежения се наблюдава обратна зависимост, напреженията намаляват при сеизмичност.

При използване на намален еластичен модул за бетона, съгласно получените резултати разрезните усилия са почти двукратно намалени. Намалени също така са и контактните напрежения. Преместванията в облицовката са пренебрежимо малко увеличени.

Следва да се отбележи, че в анализа не са отчетени допълнителни фактори като значение на геометричното решение за тунелната облицовка.

Получените резултати и направените изводи от анализа се потвърждават от характера и степента на повреда на тунелни облицовки, след преминали сеизмични въздействия. Като основен извод може да се направи, че тунелните облицовки се характеризират с добре изразено дуктилно поведение. Това значително подобрява тяхното поведение при сеизмичност. По-вероятно е нарушенията в тунелната облицовка да се реализират в първоначално недооценени зони на скалният масив, в участъци където има клинове в близко до граничното равновесие състояние, без необходимия коефициент на сигурност.

След анализ на резултатите показващи, че тунелните облицовки имат капацитет да поемат ефектите от сеизмичните въздействия при реализиране на стави, може да се анализира и предложи ревизия на поставеното ограничително условие в чл. 62 (2) от [8.18]:

„ ... При сеизмичност 8 ст. и повече се предвижда затворена облицовка (с обратен свод) без стави. ...“.

След исторически преглед и анализ на нормативните документи, действащи в държавите в Източна Европа се констатира, че подобно ограничително условие има в инструкция за сеизмично проектиране на транспортни тунели от 1982 година [8.19], и вероятно е било основание при съставянето на [8.18] в България.

„ ... 2.5. В сейсмически активных районах при расчетной сейсмичности 7 и более баллов обязательно применение обделки. При расчетной сейсмичности тоннелей 8 и более баллов обязательно применение замкнутой обделки. Конструкция обделки должна выбираться в соответствии с инженерно геологическими условиями местности и обосновывается расчетом. ...“

В резултат на интензивното развитие на тунелното строителство в последните 40 години, проведените наблюдения на настъпили повреди, както и от контролно-измервателните системи, може да се препоръча, че проектът за тунелната облицовката следва да бъде доказан със съответните изчисления при отчитане на факторите на сеизмичното въздействие.

Важен извод е, че типът на хидроизолационната система оказва пряко влияние върху съвместната работа на двете облицовки. При приложение на пръскана хидроизолация се реализира сцепление над 2 MPa, при което се осигурява съвместна работа между първичната и вторичната облицовка, докато при листова мембрана такава съвместна работа не се реализира.

Проведеният анализ показва, че разглеждането на сеизмичното въздействие в настоящата дисертация има значение не само на самостоятелна проверка при сеизмично въздействие, но и на проверка на изведената обща постановка за дисперсно армирани тунелни облицовки.

С изложеното в Раздел 8 е завършена същинската изследователска част на дисертационния труд, посветена на анализа на сеизмичното поведение на дисперсно армирани тунелни облицовки.

Получените резултати, направените изводи и тяхната връзка с поставените в разработката задачи очертават завършеността на проведеното научно изследване.

14.РАЗДЕЛ 9. ОТЧЕТ ЗА ИЗВЪРШЕНИТЕ ДЕЙНОСТИ В ПЕРИОДА НА ОБУЧЕНИЕ

През периода на обучението по докторската програма (01.03.2021 г. - 28.02.2025 г.) беше изпълнена основната част от предвидената по индивидуалния учебен и изследователски план дейност, включваща теоретична, експериментална, приложна и публикационна работа. В началния етап бяха положени предвидените изпити по специалността, по тематиката на дисертацията и по специализиран английски език, като паралелно с това беше изготвена и представена литературна справка по темата на изследването. В следващия етап беше разработена теоретичната част на дисертационния труд, представена частично на научен семинар през 2023 г. и окончателно завършена през 2024 г.

Съществена част от работата през периода беше насочена към провеждане на полеви изследвания, свързани с характеристиките и поведението на дисперсно армиран бетон с фибри, както и към проследяване на поведението на дисперсно армирани тунелни облицовки в реални условия. В тази връзка бяха извършени полеви наблюдения и професионални дейности, включително посещение на тунел Учка в Хърватия (където се изпълнява за първи път дисперсно армирана вторична тунелна облицовка за пътен тунел) и участие в авторски надзор при Тунел 1 и Тунел 2 в жп участъка Елин Пелин - Септември, където е приложена дисперсно армирана първична облицовка при тежки инженерно-геоложки условия.

14.1. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ

По темата на дисертацията беше извършена активна публикационна дейност, като са подготвени и публикувани разработки, посветени на дисперсно армирани тунелни облицовки в здрави скални масиви, сеизмичното им поведение, емпирични уравнения за определяне на остатъчната якост на бетон с фибри, приложение на обсервационния метод при тунелно проектиране, както и уравнение за определяне на носещата способност на сечение, подложено на огъване, при дисперсно армирана тунелна облицовка съгласно постановките на Еврокод 2. Резултатите от изследванията бяха представени и на научни форуми, включително международна конференция VSU’2023, научна конференция на УАСГ, както и чрез лекции и семинарни участия.

(1) Годишник на УАСГ, Том 57/ 2024 Брой 1
„Дисперсно армирани тунелни облицовки за големи тунелни профили в здраво скални масиви. Методи за проектиране. Предимства и недостатъци на различните методи. Пример от практиката“.
https://annual.uacg.bg/article/2024_57_1_06

(2) Годишник на УАСГ, Том 57/ 2024 Брой 1
„Сеизмично поведение на дисперсно армирани тунелни облицовки“ приета с положителна рецензия през м. май, 2023 год., с предвидени 20 кредита.
https://annual.uacg.bg/article/2024_57_1_07

(3) Висше строително училище „Любен Каравелов“.
XXIII МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ. ВСУ'2023
Теории за оразмеряване на дисперсно армирани тунелни облицовки от пръскан бетон.
ISSN: 1314-071X

(4) Годишник на УАСГ, Том 57/ 2024 Брой 2
Емпирични уравнения за определяне на остатъчната якост на бетон, армиран с фибри съгласно стандарт БДС EN 14651, основани на статистически анализ на експериментални данни.
https://annual.uacg.bg/article/2024_57_3_13

(5) Годишник на УАСГ, Том 57/ 2024 Брой 2
„УРАВНЕНИЕ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НОСЕЩА СПОСОБНОСТ НА СЕЧЕНИЕ ПОДЛОЖЕНО НА ОГЪВАНЕ, В КРАЙНО ГРАНИЧНО СЪСТОЯНИЕ (ULS), НА ДИСПЕРСНО АРМИРАНА ТУНЕЛНА ОБЛИЦОВКА, СЪГЛАСНО ТЕОРЕТИЧНИТЕ ПОСТАНОВКИ НА ЕВРОКОД 2“.
https://annual.uacg.bg/article/2024_57_3_13

14.2. НАУЧНО ПРИЛОЖНА ДЕЙНОСТ

Наред с това, през периода бяха изпълнявани и научно-приложни дейности, свързани с участие в изследователски проект за изготвяне на експертно становище и числен модел за Главна напорна деривация за ВЕЦ „Тешел“, както и работа по оформяне на приложенията и окончателното структуриране на дисертационния труд.

Докторантът е взел участие в два конгреса на световната тунелна асоциация (Атина, Гърция 2023 г. и Стокхолм, Швеция 2025 г.) и има публикувана 1 бр. статия на конгреса в Shenzhen, Китай 2024 г.

В резултат от проведените литературни, аналитични, експериментални и приложни изследвания беше формирана и логиката на същинската разработка, насочена към изясняване на поведението и оразмеряването на дисперсно армирани тунелни облицовки при сеизмично въздействие, включително чрез статистическа обработка на данни, търсене на зависимости и приложение в реален тунелен проект.

14.3. СТАТУС НА ЦИТИРАНИЯТА

Към датата на представяне на дисертацията не е идентифицирано/ регистрирано цитиране на заглавия от списъка с публикации.

15.РАЗДЕЛ 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научната новост на дисертационния труд се състои преди всичко в разработването и обосноваването на специализиран подход за оценка и оразмеряване на дисперсно армирани тунелни облицовки, който отчита спецификата на дисперсно армирания материал, неговата остатъчна якост и реалното му поведение след напукване. Именно това представлява съществен научен резултат, тъй като дава възможност за по-реалистична оценка на носещата способност на тунелните облицовки и преодолява ограниченията на директното прилагане на класическите правила за стоманобетон.

Към научната новост следва да се отнесе и аргументираното доказване на постановката, че пластичните стави могат да бъдат допустими като част от конструктивната работа на тунелната облицовка, когато са предварително отчетени, контролирани и конструктивно осигурени.

Съществен принос има и критичната оценка на самостоятелната приложимост на системата Rock Mass Rating RMR (Bieniawski) като основен инструмент за инженерно-геоложка оценка в сложни условия, както и извеждането на нуждата от по-гъвкав и адаптивен подход при тунелното проектиране.

Практическата значимост на труда е особено висока, тъй като разработените постановки са проверени и приложени в реални условия. Това придава на изследването не само теоретична стойност, но и непосредствена инженерна/ приложна стойност. Чрез приложението на

обсервационния метод, чрез проследяването на деформациите в пробен участък и чрез анализа на действителното поведение на системата „масив - облицовка“ беше доказано, че предложената методика може да се използва успешно при проектиране, изпълнение и контрол на тунелни облицовки в сложна геоложка среда.

Практическият принос се изразява в няколко ясно различими направления. На първо място беше доказана приложимостта на обсервационния метод като ефективен инструмент за управление на тунелното строителство и за адаптиране на проектното решение към реалното поведение на масива и облицовката.

На второ място беше обоснована възможността за оразмеряване и конструиране на тунелни облицовки с допускане на пластична работа, което създава предпоставки за по-реалистични и икономически ефективни решения.

На трето място разработените уравнения и изводи могат да бъдат използвани пряко в инженерната практика при оценка на носещата способност, при анализ на деформациите и при конструктивно оформяне на дисперсно армирани тунелни облицовки.

В обобщение считам, че дисертационният труд има както самостоятелен научен принос, така и изключително висока практическа приложимост. Поставените цели и задачи са изпълнени изцяло, хипотезите са аргументирано проверени, разработените методики са намерили приложение, а получените резултати дават основание да се приеме, че трудът отговаря на изисквания към дисертация за придобиване на образователната и научна степен „доктор“.

В резултат на проведеното изследване в рамките на настоящия дисертационен труд беше извършен последователен анализ на поведението на дисперсно армирани тунелни облицовки, изпълнявани основно от пръскан бетон със структурни фибри, при статични и сеизмични въздействия. Разработката обхвана теоретични, аналитични, статистически и приложни аспекти на проблема, като беше проследена връзката между характеристиките на материала, конструктивната работа на облицовката и реалните инженерно-геоложки условия при тунелното строителство.

В хода на дисертационното изследване беше установено, че дисперсно армираните тунелни облицовки представляват ефективно конструктивно решение, което съчетава технологични предимства, конструктивна надеждност и възможност за по-икономично изпълнение. Същевременно беше доказано, че тяхното оразмеряване не следва да се основава единствено на директно прилагане на постановките за класически стоманобетон, тъй като спецификата на дисперсно армирания бетон, и по-специално остатъчната якост и поведението след напукване, изискват специализиран аналитичен подход.

Като съществен резултат от труда бяха разработени емпирични зависимости за определяне на остатъчната якост на бетон, армиран с фибри, на основата на статистическа обработка на експериментални данни. Тези зависимости създават възможност за по-обосновано предварително определяне на механичните характеристики на материала и за тяхното използване в процеса на проектиране. Заедно с това беше формулирано уравнение за определяне на носещата способност на дисперсно армирано сечение при огъване в крайно гранично състояние (ULS - гранично състояние по носимоспособност), съобразено с общата теоретична рамка на Еврокод 2, но адаптирано към спецификата на тунелните облицовки от бетон с фибри. По този начин беше предложен инструмент с пряка инженерна приложимост при конструктивно оразмеряване и проверка на облицовки в реални проектни условия.

В дисертационния труд беше обоснована и тезата, че пластичните стави в тунелната облицовка могат да бъдат разглеждани като допустим механизъм на конструктивна работа, когато са предварително отчетени в проектния модел и са обезпечени чрез подходящо конструктивно решение. Този извод има важно значение както за по-реалистичното моделиране на работата на облицовката, така и за постигането на по-икономически ефективни проектни решения.

Съществено място в изследването заема и критичната оценка на самостоятелната приложимост на системата Rock Mass Rating RMR (Bieniawski) в сложни и променливи инженерно-геоложки условия. На тази основа беше направен изводът, че използването на подобни класификационни системи като единствена база за проектно решение не е достатъчно надеждно и че е необходимо интегрирането им с натурни наблюдения, мониторинг на деформациите и адаптивен проектен подход. Именно в този контекст беше потвърдена високата практическа стойност на обсервационния метод.

Съществен елемент от общата структура на дисертационния труд представлява разглеждането на сеизмичното поведение на дисперсно армираните тунелни облицовки. Разделът свързан със сеизмичното поведение на дисперсно армираните тунелни облицовки, завършва цялостната изследователска схема и потвърждава приложимостта на разработената методика.

16.РАЗДЕЛ 11. ЗАЯВЕНИ ПРИНОСИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

В резултат на проведените теоретични, аналитични, експериментални и приложни изследвания в настоящия дисертационен труд са получени научни и научно-приложни резултати със значим характер.

Научните приноси на дисертацията са свързани с разработването и обосноваването на нови теоретични постановки, аналитични зависимости и изчислителен подход за дисперсно армирани тунелни облицовки. Научно-приложните приноси се изразяват в тяхното внедряване и проверка в реална инженерна среда чрез натурни наблюдения, обсервационен метод и оценка на поведението на облицовките при експлоатационни и сеизмични въздействия.

16.1. НАУЧНИ ПРИНОСИ

Към научните приноси се отнасят резултатите, чрез които е доразвита теоретичната и аналитичната основа за оценка на дисперсно армирани тунелни облицовки:

Разработен и теоретично обоснован е специализиран аналитичен подход за оценка и оразмеряване на дисперсно армирани тунелни облицовки, при който са отчетени остатъчната якост на опън при огъване и следпукнатинното поведение на материала. По този начин е разширена съществуващата база за оценка на работата на тунелните облицовки спрямо подходите, основани единствено на принципите на класическия стоманобетон или на опростени емпирични зависимости.

Изведени са уравнения за определяне на остатъчната якост на опън при огъване, както и зависимости за оразмеряване на огъване на дисперсно армирани сечения, приложими при тунелни облицовки, с което е осигурена необходимата връзка между експериментално установените материални характеристики и инженерния изчислителен модел.

Обоснована е възможността дисперсно армираните тунелни облицовки да запазват своята носеща способност и след настъпване на напукване, благодарение на формирането на пластични зони и способността за поемане на допълнителни деформации при статични и сеизмични въздействия. Разширена е изследователската рамка за оценка на поведението на дисперсно армирани тунелни облицовки при сеизмично въздействие, като в обща постановка са разгледани напрегнато-деформираното състояние, носещата способност, остатъчната работоспособност и специфичните особености на дисперсно армирания пръскан бетон като конструктивен материал.

16.2. НАУЧНО - ПРИЛОЖНИТЕ ПРИНОСИ

Към научно-приложните приноси следва да бъдат отнесени резултатите, чрез които разработените постановки са приведени в приложим за инженерната практика вид, проверени чрез реални наблюдения и насочени към проектирането, мониторинга и конструктивната оценка.

Доказана е приложимостта на разработения подход за по-надеждно и по-реалистично проектиране и проверка на дисперсно армирани тунелни облицовки в условията на реалната инженерна практика, включително при отчитане на сеизмични въздействия.

Потвърдена е приложимостта на обсервационния метод като основен инструмент за управление, наблюдение и проектна адаптация при тунелно строителство в сложна геоложка среда, чрез анализ на натурни наблюдения, мониторинг на деформациите и проследяване на поведението на пробен участък.

Осъществено е натурно потвърждаване на проектно решение чрез изпълнение и проследяване на пробен участък в реален железопътен тунел, реализиран в две тунелни тръби, при който е приложена дисперсно армирана първична облицовка и е проведено продължително системно наблюдение. Установено е, че крепежната конструкция запазва своята носеща способност и експлоатационна годност, без формиране на пластични стави и без навлизане в очертанията на бъдещата вторична облицовка.

Разширена е инженерната оценка на поведението на дисперсно армирани тунелни облицовки при псевдостатично сеизмично въздействие чрез практически приложим анализ на напрегнато-деформираното състояние, носещата способност и устойчивостта на облицовката при условия, съответстващи на инженерната/ проектантската практика.

16.3. АВТОРСКО ЗАЯВЛЕНИЕ ЗА САМОСТОЯТЕЛНОСТ И ДОБРОСЪВЕСТНОСТ

Настоящият дисертационен труд е резултат от самостоятелната научноизследователска, аналитична и приложна работа на автора, извършена в рамките на обучението по докторската програма и професионалната му дейност по разглежданата тема. Научната разработката обединява резултати от литературен анализ, нормативни и теоретични постановки, статистическа обработка на данни, инженерни оценки, проектни разработки, натурни/ реални наблюдения и авторски обобщения, насочени към изясняване на поведението на дисперсно армирани тунелни облицовки при статични и сеизмични въздействия.

При изготвянето на труда са използвани научни публикации, нормативни документи, технически източници, утвърдени инженерни подходи и формули на други автори (посочени с тяхното име) и специализирана терминология, характерни за изследваната област. В отделни случаи сходства във формулировки, понятия, класификации, нормативни определения и общоприети технически постановки следва да се разглеждат като естествено произтичащи от спецификата на научната и професионалната област, а не като претенция за изключително авторство върху вече установени знания и подходи.

Авторският принос в настоящия труд се изразява в подбора, систематизирането, критичния анализа и интерпретацията на съществуващите знания, както и в разработването на собствени изводи, зависимости, постановки и приложения, свързани с оразмеряването, конструктивното формиране и инженерната оценка на дисперсно армирани тунелни облицовки. В този смисъл дисертационният труд следва да се разглежда като самостоятелна авторска разработка, основана на добросъвестно използване на съществуващата научна и инженерна база и на нейното доразвиване по отношение на поставените цели и задачи.

17.ЗАКЛЮЧИТЕЛНИ БЕЛЕЖКИ НА АВТОРА

Като естествено продължение на работата по дисертацията виждам своето бъдещо научно-академично развитие в Катедра „Хидротехника и хидромелиорации“ при Университета по архитектура, строителство и геодезия, гр. София в няколко взаимно свързани направления. На първо място, считам, че след защитата на дисертационния труд е необходимо да продължа последователно да развивам научната тематика, по която съм работил, така че тя да се превърне в устойчиво направление в моята преподавателска, изследователска и експертна дейност. Това означава не само да публикувам допълнителни статии по отделни въпроси, но и да изградя собствена трайна академична специализация в областта на подземното строителство (хидротехническо и транспортно), тунелните облицовки, скалната механика, приложението на пръскания бетон с фибри, дисперсно армираните облицовки и сеизмичната устойчивост на подземни конструкции.

В рамките на катедра “Хидротехника и Хидромелиорации“ виждам възможност да развивам тази тематика в тясна връзка с по-широкия профил на хидротехническото и подземното строителство. Това е особено важно, защото много от задачите в съвременната инженерна практика са интердисциплинарни и включват едновременно подземни съоръжения, геотехнически и

хидрогеоложки условия, строителна механика и конструктивна сигурност. В този смисъл натрупаният в дисертацията опит може да бъде пренесен и към анализ на подземни хидротехнически съоръжения, транспортни тунели, водопровеждащи тунели и други инженерни обекти, които са близки до профила на катедрата и на университета.

Считам също, че като действащ преподавател - асистент следва да насоча усилия към изграждане на устойчив преподавателски профил, основан на връзката между теория и практика. Работата по реални тунелни обекти, включително при тежки инженерно-геоложки условия и при приложение на дисперсно армирани първични облицовки, вече ми е дала основа за подобен подход.

В бъдеще това би могло да се развие чрез участие в упражнения, курсово и дипломно проектиране, разработване на учебни материали, специализирани лекционни модули и практически казуси за студентите. За мен е важно преподаването да не се ограничава до предаване на утвърдени постановки, а да създава в студентите умения за инженерно мислене, критична оценка на проектните допускания и разбиране на реалното поведение на конструкциите.

Особено перспективно направление за академично развитие виждам в създаването на изследователска линия, свързана с експерименталното и числено моделиране на дисперсно армирани елементи и тунелни облицовки. В дисертацията вече са заложени основите чрез използването на емпирични, аналитични и числени методи, както и чрез анализ на натурни данни. В бъдеще тази линия може да бъде развита чрез включване в научноизследователски проекти, изграждане на междукатедрено сътрудничество в УАСГ и работа с докторанти и дипломанти по теми, свързани с дисперсно армираните бетони, тунелното проектиране и сеизмичната осигуреност на подземните конструкции.

От гледна точка на собственото ми академично израстване считам, че следващата цел след защита на дисертацията трябва да бъде формирането на ясно разпознаваем научен профил чрез последователни публикации в реферирани издания, участие в национални и международни научни форуми и включване в проектна и експертна дейност, която да „захранва“ научната работа с реални инженерни проблеми.

Вече направените публикации и участия в конференции показват, че подобно развитие е не само възможно, но и естествено продължение на досегашната ми работа. Следващата логична стъпка е тези дейности да бъдат надградени с по-висока публикационна активност, с разширяване на международните контакти и с участие в научни проекти, свързани с подземни и хидротехнически съоръжения.

В по-дългосрочен план виждам своето развитие като преподавател и изследовател, който допринася за утвърждаването на катедрата и на УАСГ в области, в които съществува реална потребност от по-дълбока научна и приложна експертиза. Това включва разработване на съвременни теми, свързани с устойчивостта на подземните конструкции, поведението на облицовките при сложни въздействия, приложението на обсервационния метод, взаимодействието между конструкция и масив, както и адаптирането на международния опит към българската инженерна практика. В този контекст смятам, че моето бъдещо академично развитие следва да бъде насочено не само към лична научна реализация, но и към изграждане на среда за обучение, научна работа и професионално развитие на студенти, дипломанти и бъдещи докторанти.

Извършеното в рамките на дисертационния ми труд изследване създава и добра основа за неговото последващо развитие в самостоятелна научна монография. Това е естественото продължение на настоящата работа е разширяването ѝ от дисертационен труд, насочен към решаването на конкретни научни задачи, към по-широк теоретично приложен труд, в който резултатите да бъдат систематизирани, доразвити и представени като завършена авторска концепция за проектиране, анализ и приложение на дисперсно армирани тунелни облицовки. Това развитие е напълно логично, тъй като още в структурата на дисертацията е заложено направление за следващо развитие по темата, а отделните части на изследването обхващат както методите за проектиране в здрави скални масиви, така и теориите за оразмеряване, ограниченията на RMR, приложението на обсервационния метод и сеизмичното поведение на облицовките.

Бъдещата ми монография следва да надгради дисертационния труд в няколко посоки. На първо място, необходимо е да бъде разработена единна методологична рамка за анализ на дисперсно армирани тунелни облицовки, в която да се обединят материалният модел на пръскания бетон с фибри, механичната логика на следпукнатинното поведение, оценката на остатъчната якост и конструктивното приложение при различни проектни схеми. Подобно развитие би позволило

изведените в дисертацията уравнения за остатъчна якост и за носеща способност при огъване да бъдат представени не само като отделни резултати, а като част от цялостна авторска теория за инженерно приложение на дисперсната армировка при тунелни облицовки.

На второ място, монографичното развитие следва да разшири сравнителния анализ на проектните подходи при здрави скални масиви, при преходни геоложки зони и при участъци с повишена деформационна чувствителност.

На трето място, считам за особено важно да бъде разширено изследването върху сеизмичното поведение на дисперсно армираните тунелни облицовки. По този начин монографията би имала потенциал да се превърне в едно от малкото цялостни български научни изследвания, които разглеждат едновременно дисперсната армировка, тунелното поведение и сеизмичното проектиране.

На четвърто място, за важно бъдещо направление приемам задълбочаването на връзката между натурните наблюдения и проектния анализ. Това би имало висока стойност както за научната общност, така и за проектантската и строителната практика.

18.РАЗДЕЛ 12. БИБЛИОГРАФИЯ

Настоящата библиография е обобщена за цялата дисертация и е подредена по азбучен ред според фамилията на първия автор, съответно според наименованието на нормативния документ, стандарта или източника. По този начин се осигурява едновременно общо библиографско обобщение за целия труд и ясно позоваване към използваната литература в отделните раздели.

18.1. НАУЧНА ЛИТЕРАТУРА

Amin A., Foster S. J., Muttoni A., Derivation of the σ-w relationship for SFRC from prism bending tests, Structural Concrete, 2015, pp. 93-105. [4.5]

Amin A., Foster S. J., Numerical modelling of large-scale steel fibre reinforced - reinforced concrete beams failing in shear. FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop. [4.6]

Bangash, M., (1989) Concrete and concrete structures: numerical modelling and applications. [2.6]

Barton N. Using the Q-system. Rock mass classification and support design. Revised and new edition, Oslo, June 2022. [2.10]

Barton N. Using the Q-system. Rock mass classification and support design. Handbook. 2022. [3.3] [7.4]

Barton, N. Forty Years with the Q-system - Lessons and Developments. Nick Barton and Associates, 2015. [7.6]

Barrett, S.V.L., McCreath, D.R. Shotcrete support design in blocky ground: towards a deterministic approach. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10(1): 78-99. [3.4] [7.7]

Bieniawski, Z.T. (1984) Rockmechanics Design in Mining and Tunneling, Balkema, Rotterdam. [2.9]

Brandl, J. Challenges to Tunnel Design. A Case History of the Bolu Tunnel. [2.24]

Cardosoa M. G., Lameirasa R. d. M., Capuzzoa V. M. S. Influence of concrete strength, fiber content and aspect ratio in the residual flexural strength of steel fiber reinforced self-compacting concrete, ISSN 1983-4195. [4.10]

CNR-DT 204/2006. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato. Design recommendation, Rome, Draft 2006. [3.12]

De Pauw P., Taerwe L., Van den Buverie N., Moerman W. Replacement of shear reinforcement by steel fibres in pretensioned concrete beams. 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8. [4.7]

De Wilder, K., De Smedt, M., Lava, P., Reynders, E., De Roeck, G., and Vandewalle, L. Experimental analysis of the mechanical behaviour of shear-deficient pretensioned steel-fibre reinforced concrete beams.

In: Proceedings of the 9th RILEM International Symposium on fibre reinforced concrete (BEFIB 2016), Canada, 1248-1262. [4.8]

Di Tommaso A. (1990), Le opere preliminari di sostegno in spritzbeton fibroarmato, Officine Maccaferri. [3.8]

Ding, Y. (1998) Technologische Eigenschaften von jungem Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton, University of Innsbruck. [2.7]

Ding, Y. (1998) The properties of young steel fibre reinforced shotcrete. [2.8]

Fredriksson, A. Bergmekanik. Dimensionering av sprutbetong som ytförstärkning. 1995. [3.5] [7.10]

Gere J. M., Timoshenko S. P. (1997). Mechanics of Materials. [2.4]

Griffith A.A., The phenomena of rupture and flow in solids. Philos. Trans. R. Soc. Lond. A 221, 163-198 (1921). [2.1]

Hashash, Y. Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology 16 (2001). [2.14]

Hoek, E. Putting numbers to geology - an engineer's viewpoint. Published in the Quarterly Journal of Engineering Geology, 1999, 32(1): 1-19. [7.5]

Holmgren, J. Shotcrete, Punch-loaded Shotcrete Linings on Hard Rock. Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo, 1979, 7(2). [7.9]

Holmgren, J. Bergförstärkning med sprutbetong. Vattenfall. 1992, ISBN 91-7186-298-6. [7.11]

Ignatiev, N. Lectures anti-seismic construction. [8.6]

Kaiser, P.K. and Maloney, S.M. (1997) Scaling Laws for the Design of Rock Support. Pure and Applied Geophysics, 150, 415-434. [2.16]

Kaiser PK, McCreath DR, Tannant DD (1996) Canadian rockburst support handbook. Geomechanics Research Centre. Canada. [2.18]

Kiyota, T., Ikeda, T., Konagai, K. and Shiga, M. (2017). Geotechnical Damage Caused by the 2016 Kumamoto Earthquake, Japan. International Journal of Geoengineering Case Histories. [2.25]

Lameiras R., Joaquim A.O. Barros J.A.O., Azenha M. Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC). Cement & Concrete Composites 59 (2015) 60-76. [4.9]

Löfgren, I. Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005. [2.12] [3.13] [4.2]

Lourenço L. A. P. Betão Reforçado com Fibras: aplicações e técnicas de inspeção e reforço de elementos estruturais afetados pela ação de um fogo. Universidade do Minho Escola de Engenharia. [4.11]

Malmgren, L. Shotcrete Rock Support Exposed to Varying Load Conditions. Luleo University of Technology, 2001, ISSN 1402-1757. [8.16]

Markov, I. Stroitelna Statika, 2014, Universitet po arhitektura, stroitelstvo i geodezia, ISBN 978-954-724-073-5. [8.17]

Marti P., Pfyl T., Sigrist V., Ulaga T. (1999), Harmonized test procedures for steel fiber-reinforced concrete, ACI Materials Journal, V. 96, N. 6, pp. 676-685. [3.9]

Martinez-Martinez J., Benavente D., Garcia-del-Cura M.A. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71(2): 263-268. [8.11]

Naeim, F. The seismic design handbook, Springer Science Business Media, 2001, ISBN 978-1-4613-5681-3. [2.15] [8.2]

Nzambi A.K.L.L., Ntuku J. B., de Oliveira D.R.C. Empirical equations for flexural residual strengths in concrete with low volumetric fractions of hook-end steel fiber. DOI:10.1002/eng2.12490. [4.14]

Oikonomou-Mpegetis S. Behaviour and design of steel fibre reinforced concrete slabs. Structural Engineering Research Group, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London. [4.12]

Owen, G. N., Scholl, R. E. Earthquake engineering of large underground structures. Federal Highway Administration, 1981, FHWA/RD-80/195. [2.13] [8.4]

Pal, P. Dynamic Poisson's Ratio and Modulus of Elasticity of Pozzolana Portland Cement Concrete. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2019, 9(2): 131-144. [8.12]

Potts, D., Zdravkovic, L. Finite element analysis in geotechnical engineering theory. London: Thomas Telford; 1999. [8.5]

Power M.S., Rosidi D., Kaneshiro J.Y. (1998) Seismic Vulnerability of Tunnels and Underground Structures Revisited. Proc. of North American Tunnelling ’98. Newport Beach, CA: Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 243-250. [2.17] [8.3]

Rabcewicz L. 1964. The New Austrian Tunnelling Method, Part one, Water Power, November 1964, 453-457; Part two, Water Power, December 1964, 511-515. [3.1]

Rabcewicz L. & Golser J. 1973. Principles of dimensioning the supporting system for the “New Austrian Tunnelling Method”, Water Power, March 1973, 88-93. [3.2]

Salman, M. The Ratio between Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Normal and High Strength Concrete. Journal of Engineering and Development, 2006, 10(2), ISSN 1813-7822. [8.13]

Schädlich, B. Shotcrete model. Internal report: Implementation, validation and application of the shotcrete model. 2014, Graz University of Technology. [8.9]

Sørensen, B. F., & Lilholt, H. (2016). Fiber pull-out test and single fiber fragmentation test - analysis and modelling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [2.2]

Stephen S., Gettu R. Rate-dependence of the tensile behaviour of fibre reinforced concrete in the quasi-static regime. DOI: 10.1617/s11527-019-1405-2. [4.13]

Stål, T., Wedel, P.O. Handboken Bygg G Geoteknik. Stockholm: LiberFörlag, 1984. [7.14]

Stille H. (1992), Rock support in theory and practice, Proceedings of the International Symposium on Rock Support. [3.7]

Stille, H., Holmberg, M., Nord, G. Support of weak rock with grouted bolts and shotcrete. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1989, 26(1): 99-113. [7.12]

Stille, H. Valvbildning i sprickigt hårt berg - Del 1: Teori. Institutionen för jord- och bergmekanik, KTH, Stockholm, 1980. [7.13]

Thomas, A., Sprayed Concrete Lined Tunnels, Second Edition. [2.3]

Trindade Y. T. Numerical modeling of the post cracking behavior of SFRC and its application on design of beams according to fib model code 2010. Polytechnic School of the University of São Paulo, Department of Structural and Geotechnical Engineering, 2018:171. [4.15]

Ulfkjær, J.P., Krenk, S. and Brincker, R. Analytical Model for Fictitious Crack Propagation in Concrete Beams. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 121, No. 1, 1995, 7-15. [3.14]

Velichkova Ts. An estimation of some factors influencing north atlantic oscillation using multiple regression. SES 2022. [5.9]

Wang, J.-N., 1993. Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach, Monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York. [2.19] [8.1]

Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R., Huang, T.H., 2001. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake. Tunn. Undergr. Space Technol. 16, 133-150. [2.20] [8.8]

Wang, Z. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake. [2.21]

Yazdani, M. 2013. Extended Mononobe-Okabe Method for Seismic Design of Retaining Walls. [2.22]

Youssef M.A. Hashasha, Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology 16 (2001). [2.23]

18.2. НОРМАТИВНИ ДОКУМЕНТИ, СТАНДАРТИ И РЪКОВОДСТВА

БДС EN 1990. Еврокод. Основи на конструктивното и геотехническото проектиране. [5.6]

БДС EN 1991. Еврокод 1: Въздействия върху строителните конструкции. [2.5] [3.13] [4.1] [5.1]

БДС EN 1992-1-1. Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. [7.1]

БДС EN 1992-2:2006. Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 2: Стоманобетонни мостове. Правила за проектиране и конструиране. [7.2]

БДС EN 1997- 1. Еврокод 7: Геотехническо проектиране. Част 1: Основни правила. [4.4] [7.3]

БДС EN 1998-1. Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмична устойчивост. Част 1-1: Общи правила и сеизмични въздействия. [8.7]

БДС EN 1998-5. Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 5: Фундаменти, опорни конструкции и геотехнически аспекти.

БДС EN 206-1. Бетон. Спецификация, експлоатационни показатели, производство и съответствие. Част 1: Експлоатационни показатели, изисквания, производствен контрол и критерии за оценяване на единични стойности. [5.3] [8.15]

БДС EN 206-2. Бетон. Спецификация, експлоатационни показатели, производство и съответствие. Част 2: Оценяване на съответствието и сертифициране.

БДС EN 13670. Изпълнение на бетонни и стоманобетонни конструкции.

БДС EN 14487-1. Торкретбетон. Част 1: Определения, изисквания и съответствие.

БДС EN 14487-2. Торкретбетон. Част 2: Изпълнение.

БДС EN 14651:2005+A1:2007. Метод за изпитване на бетон, армиран с метални влакна. Определяне на якостта на опън при огъване (граница на пропорционалност (LOP), остатъчна). [4.3] [5.2].

БДС EN 14889-1. Влакна за армиране на бетон. Част 1: Стоманени влакна. Определения, изисквания и съответствие. [5.4]

БДС EN 14889-2. Влакна за армиране на бетон. Част 2: Полимерни влакна. Определения, изисквания и съответствие. [5.5]

Норми за проектиране на пътни и железопътни тунели. Заповед № РД-08-139 от 04.05.1988 г.. [8.18]

fib Model Code for Concrete Structures 2010. 2013 fédération internationale du béton. ISBN: 978-3-433-03061-5. [2.11]

Projektering av bergkonstruktioner. Rapport. Trafikverket. Publikationsnummer 2019:062, ISBN: 978-91-7725-412-6. [3.6] [7.8]

RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, σ-ε design method. Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 36, 2003, pp. 560-567. [3.10] [5.7]

RILEM TC 162-TDF. Design of steel fibre reinforced concrete using the σ-w method - principles and applications. Materials and Structures, Vol. 35, June 2002, pp. 262-278. [3.11] [5.8]

Instruktsia po uchetu seysmicheskih vozdeystviy pri proektirovanii gornii X transportnii X tonneley VSN 193-81. Ministerstvo transportnogo stroitelystva. [8.19]

Material Models Manual Plaxis 2D CONNECT Edition V22.02, Bentley. [8.10]

PLAXIS 2D 2023.1. Tutorial Manual 2D. [8.14]

ТЕРМИНОЛОГИЧНИ БЕЛЕЖКИ ОТ АВТОРА

(1) Използването на термина „фибра“ или „фибри“ в рамките на настоящия дисертационен труд е резултат от съзнателен терминологичен избор, основан както на научни и професионални съображения, така и на стремеж към яснота, прецизност и последователност в изложението.

Използването на термина „фибра“ съответства на международно утвърдената научна и инженерна терминология, в която широко се прилагат понятия като steel fiber, polypropylene fiber, fiber reinforced concrete и fiber reinforced shotcrete. Той представлява пряк и разпознаваем еквивалент на чуждоезичните означения и улеснява връзката между българския научен текст, международните публикации, стандартите и изследователските резултати.

Наред с това, терминът „фибра“ осигурява по-висока терминологична прецизност в инженерния контекст. При дисперсно армирания бетон се разглежда не произволно влакнесто образуване, а специално произведен армиращ елемент, предназначен за влагане в циментова матрица с цел подобряване на нейните механични и експлоатационни характеристики. Именно затова „фибра“ е по-точен термин от „влакно“, който има по-широко общоупотребимо значение.

Допълнителен аргумент е широкото утвърждаване на тази употреба в професионалната практика, където трайно се използват изрази като „стоманени фибри“, „полимерни фибри“, „фибробетон“ и „пръскан бетон с фибри“. Това показва, че терминът е функционално установен в инженерния език и позволява по-коректно описание на ролята на армиращия елемент в структурата и следпукнатинното поведение на дисперсно армирания бетон.

Същевременно използването на термините „фибра“ и „фибри“ в настоящия дисертационен труд не представлява отричане на нормативно установената употреба на термините „влакно“ и „влакна“, а редакционен и научно-стилистичен избор. Поради това при цитиране на стандарти, нормативни документи и официални определения се запазва оригиналната терминология на съответния източник.

(2) В дисертацията като предпочитан и основен термин се използва „пръскан бетон“. Под този термин се разбира бетонова смес, транспортирана и полагана под налягане чрез маркуч или тръба, нанасяна с висока скорост върху основата, при което уплътняването се осъществява непосредствено при полагането. Терминът „торкрет“ не следва да се използва като пълен синоним на „пръскан бетон“, а само в по-тесен, исторически или технологично конкретизиран смисъл - когато се има предвид смес с пясък като добавъчен материал, съответстваща на понятието gunite. По тази причина в целия труд е прието да се прилага единно терминологично решение, а именно:

„пръскан бетон“ - като общ и нормативно/ технически неутрален термин;

„торкрет“ - само при необходимост от историческо или технологично разграничение.

Когато материалът съдържа конструктивни фибри, използваните терминологични форми са:

„пръскан бетон, армиран с фибри“;

„дисперсно армиран пръскан бетон“.

(3) В настоящия труд терминът „първична тунелна облицовка“ се използва за носещия облицовъчен елемент от пръскан бетон, който е основна част от началният тунелен крепеж. Когато се има предвид цялата поддържаща система, се използва терминът „тунелен крепеж“.

(4) Терминът „остатъчна якост“ е приложен в дисертацията като ключов показател за поведението на материала след образуване на пукнатина, когато фибрите осигуряват пренос на усилия през напуканото сечение. Терминът „остатъчна якост“ се използва като обобщено понятие за носимоспособността на дисперсно армирания бетон след образуване на пукнатина.

(5) Остатъчна якост на опън при огъване.

Когато е необходима по-висока точност, в дисертацията се използва терминът „остатъчна якост на опън при огъване“, тъй като именно той съответства на изпитванията, класовете и проектните зависимости за бетон, армиран с фибри.

(6) Терминът „сеизмичност“ се използва в дисертацията за обозначаване на природната характеристика на района и на общата среда, в която се оценява поведението на тунелното съоръжение.

(7) Терминът „сеизмично въздействие“ се използва тогава, когато се разглежда действието на земетръса върху конкретната конструкция и нейния конструктивен отговор.

(8) Терминът „обсервационен метод“ се използва в смисъл на инженерски подход, при който проектното решение се съпровожда от наблюдение, анализ на реалното поведение и предварително подготвени корективни мерки.

(9) Като основен термин в дисертацията се използва „скален масив“, тъй като изследването е насочено към тунели в скални (здраво и слабо скални) условия и към взаимодействието между облицовката и скалната среда.

(10) Терминът „носеща способност“ се използва в труда за обозначаване на способността на облицовката да поема натоварванията без достигане на гранично състояние по разрушение.

(11) Терминът „експлоатационна годност“ се използва за обозначаване на състоянието, при което облицовката запазва своята функционалност, допустими деформации и контролирано пукнатино образуване през експлоатационния срок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Създаването на този дисертационен труд е резултат не само от лични усилия, но и от подкрепата, доверието и помощта на много хора, които по различен начин бяха до мен по този път.

На първо място искам да изразя своята най-дълбока благодарност, признание и любов към моето семейство. Благодаря им за любовта, търпението, разбирането и безусловната подкрепа през всички години, в които съчетавах професионалните си ангажименти, научната работа и личните отговорности. Тяхната вяра в мен ми даваше сили в моменти на съмнение и умора и беше най-сигурната опора по пътя към завършването на този труд.

Искрено благодаря на моя научен ръководител за отделеното време, за вниманието, за професионалното отношение и за ценните насоки, които ми бяха давани през целия процес на работа. Подкрепата, търпението и критичният поглед имаха съществено значение не само за оформянето на дисертацията, но и за моето развитие като изследовател.

Благодаря на фирмите „Sweco“ Швеция, „Tyrens“ Швеция, „Ей енд Си Консулт“ България и специално и на всички колеги, с които съм работил през годините. Съвместната работа, решаването на реални инженерни задачи и споделеният практически опит допринесоха съществено за професионалното ми израстване и за формирането ми като проектант. Голяма част от въпросите, които поставих в настоящата дисертация, са пряко свързани с уроците, които съм получил именно в практиката.

Изказвам своята признателност към колегите от Катедра „Хидротехника и хидромелиорации“ при Университета по архитектура, строителство и геодезия за подкрепата, насоките и доброжелателното отношение. За мен беше важно да работя в среда, в която научното търсене, професионалният разговор и колегиалността вървят заедно.

Изразявам специална благодарност към ДП НКЖИ за предоставената възможност за реализация на опитен участък и за използването на данни, които имаха съществена роля за практическата насоченост и доказателствената стойност на изследването. Възможността научните постановки да бъдат проверени в реални условия беше изключително ценна за мен.

Благодаря и на фирмите доставчици и производители на дисперсна армивока, предоставили данни от проведени лабораторни опити. Тази помощ имаше важно значение за аналитичната част на разработката и за възможността част от изводите в труда да бъдат обосновани на реална експериментална основа.

На всички останали, които по един или друг начин са били част от професионалния ми път, изказвам своята искрена признателност. Благодаря за доверието, за споделения опит, за подадената ръка в точния момент и за уроците, които са допринесли за моето изграждане като успешен проектант и като човек.

Автор:
Мартин Петков,
София, България
07.2026 г.

AUTHOR ABSTRACT
OF A DISSERTATION FOR THE AWARD OF THE EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR

ENTITLED:

FIBRE-REINFORCED TUNNEL LININGS AND THEIR BEHAVIOUR UNDER SEISMIC LOADING

FIELD OF SPECIALISATION: HYDRAULIC ENGINEERING
PROFESSIONAL FIELD: 5.7. ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY

Scientific supervisor: Assoc. Prof. Viktor Tashev, PhD, CEng,
Department of Hydraulic Engineering and Irrigation and Drainage
University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy (UACEG), Sofia, Bulgaria

Author of the dissertation: Martin Petkov, M.Sc., CEng

Keywords: *tunnel lining; competent rock masses; hard rock; fibre-reinforced shotcrete; fibre-reinforced tunnel linings; rock mechanics; observational method; application of structural fibres; tunnel engineering; residual strength of fibre-reinforced concrete; empirical equations; load-bearing capacity; Eurocode 2; flexural load-bearing capacity; seismicity; seismic design of tunnels; lining joints.*

INTRODUCTION

The development of modern hydraulic, transport, and other engineering infrastructure is inseparably associated with the design and construction of underground works, among which tunnels occupy a particularly important position. The increasing demands for structural reliability, safety, and durability, together with the need to optimise construction technologies, require the continuous refinement of design approaches and construction practices in tunnel engineering.

Within this context, the tunnel lining has a decisive function in ensuring excavation stability, limiting deformation of the surrounding rock mass, and safeguarding the serviceability of the structure throughout its operational life.

This introductory chapter sets out the principal premises of the dissertation, including the relevance of the scientific and engineering problem addressed, the aim and objectives of the research, its object and subject, the working hypotheses, the methods employed, and the expected scientific and applied contributions.

Experience in engineering practice has shown that, in contemporary tunnel construction, it is no longer sufficient to treat the lining merely as a passive structural component intended simply to withstand the pressure of the surrounding ground. On the contrary, the behaviour of the tunnel lining must be assessed as part of the integrated system comprising the rock mass, the primary lining, and the secondary lining, within which load-bearing capacity, deformability, and serviceability arise from the interaction of the individual components.

For this reason, tunnel linings constructed from fibre-reinforced shotcrete have found increasingly wide application. The reasons for this are not solely technological. It is well established that shotcrete enables rapid and flexible execution, provides good adhesion to the excavation contour, and becomes effective at an early stage after excavation.

The more important issue, however - and indeed the principal advantage - is that the incorporation of structural fibres modifies the behaviour of the material after crack initiation. This is the essential engineering benefit of fibre reinforcement: not so much an increase in compressive strength as the provision of residual load-bearing capacity, the control of crack propagation, and the maintenance of a more ductile lining response.

This aspect occupies a central place in the dissertation, including in relation to the need to formulate analytical relationships for determining the flexural load-bearing capacity of fibre-reinforced sections subjected to pure bending.

The theoretical basis of fibre-reinforced tunnel linings differs substantially from that of conventional reinforced concrete structures. Accordingly, the design model for fibre-reinforced linings must account not only for the onset of first cracking, but also for post-cracking behaviour, fracture energy, and the residual load-bearing capacity of the material.

From the designer's perspective, the topic is particularly relevant because the practical application of fibre-reinforced shotcrete in tunnels has, to some extent, advanced ahead of the corresponding level of codified and methodological clarification.

In practice, tunnel design frequently relies on a combination of code requirements, empirical relationships, test results, and accumulated engineering experience. This is not in itself a deficiency, but it creates a risk of ambiguity in design decisions, particularly when it is necessary to assess the actual behaviour of the lining in the cracked state, to perform verification at the ultimate limit state (ULS), or to determine the extent to which residual strength may be reliably incorporated into design.

For this reason, the dissertation devotes separate attention to calculation methods, to the difficulties encountered in design verification, and to the unresolved issues associated with fibre reinforcement.

Attention is also directed to tunnel linings in competent rock masses. This is why the dissertation considers, in parallel, code-based requirements, empirical analysis, numerical modelling, block analysis, and the determination of displacement threshold values in the context of a new design solution for a fibre-reinforced lining.

A substantial part of the problem addressed in the dissertation concerns the proper choice of design approach. Instead, the design should be validated and, where necessary, adjusted through monitoring and analysis of measured deformations.

Another group of issues examined in the dissertation, which also gives the present research its contemporary relevance, is associated with the seismic behaviour of underground structures. The position adopted in the dissertation is that the key issue is not whether a tunnel fails through a mechanism analogous to that of above-ground structures, but whether, after seismic loading, it preserves its load-bearing capacity, the integrity of the lining, and its serviceability.

This further highlights the importance of fibre reinforcement. If, under static loading, fibre reinforcement is regarded mainly as a means of improving post-cracking behaviour, then under seismic action its role becomes even more significant, since the ability of the lining to continue functioning after local cracking, without a sudden loss of load-bearing capacity, is directly related to its stability and to its capacity to accommodate additional deformation. Consequently, the investigation of residual strength, ductility, stiffness, and load-bearing capacity of fibre-reinforced linings is not merely a theoretical issue, but one that directly concerns the safety of tunnel structures.

In view of the foregoing, the principal focus of the present dissertation is to clarify the specific features of the structural response of fibre-reinforced tunnel linings, to assess the influence of residual strength on their load-bearing capacity, and to analyse their behaviour under seismic loading.

The research is directed not only towards reviewing and systematising existing concepts, but also towards identifying a practically applicable engineering approach capable of linking the experimental characteristics of the material, design verification procedures, and the actual structural response under tunnel construction conditions. In this sense, the dissertation has both scientific and applied significance.

The scientific value of the dissertation lies in its attempt to bring together, within a common framework, several groups of issues which in practice are often treated separately, namely: the behaviour of fibre-reinforced tunnel linings (shotcrete with fibres), the design of fibre-reinforced sections, the performance of the lining in competent rock mass, the application of the observational method, and the assessment of the structure under seismic loading.

The present dissertation has been developed on the conviction that, in tunnel engineering, a sound engineering solution is the result neither of theory alone nor of practice alone, but of their consistent integration.

In the case of fibre-reinforced tunnel linings, this means addressing simultaneously the material, the structural model, the geological environment, and the actual behaviour of the structure. Only in this way can a reliable answer be given to the question of the extent to which such linings represent an effective and safe solution not only under conventional loading, but also under seismic action.

One of the most substantial scientific-applied and practice-oriented parts of the present dissertation is associated with the execution, monitoring, and analysis of a trial section in a real railway tunnel, in which the observational method in accordance with BDS EN 1997 was applied in combination with a fibre-reinforced primary lining. The trial section was implemented in two tunnel tubes, at two tunnel faces, which in itself demonstrates the substantial organisational, measurement, and analytical scope of the work undertaken.

The execution of the trial section itself was also accompanied by operational engineering management. Upon reaching Alarm Levels 1 and 2, instructions were issued to the Contractor, while upon a single occurrence of Alarm Level 3, an immediate site inspection was carried out, the behaviour of the profile was analysed, and measures were prescribed for continuation of the works under enhanced control. This is characteristic of a properly applied observational method: the design is not treated as a predefined scheme exempt from revision, but as a controlled system with feedback between observation, analysis, and engineering intervention.

Also presented as scientific-applied work is a design case involving an underground railway station in Gothenburg, Sweden, where a solution for competent rock masses was implemented using an alternative method that accounted for fibre-reinforced shotcrete support. At the time of submission of the dissertation, the project had already been executed, and the assumptions made, the solutions and analyses presented, and the expected results had all been fully validated and confirmed.

From a scientific-applied perspective, the results achieved are particularly important for meeting the objectives of the dissertation. Analysis of the observations shows that, under the solutions adopted, both in weak and in competent rock mass, the support structure retains its load-bearing capacity and serviceability, without the formation of plastic hinges under static loading, without intrusion into the profile of the future secondary lining, and without substantial structural deterioration within the actual trial section.

Having outlined the relevance of the research problem, as well as the subject, aim, and objectives of the dissertation, the following sections examine in sequence the theoretical foundations, the existing research and design approaches, and the applied aspects related to fibre-reinforced tunnel linings and their behaviour under seismic loading. In this way, a logical connection is established between the stated scientific problem, the analytical part of the research, and the conclusions and contributions formulated on this basis.

The dissertation material is structured into separate sections, which reflects a deliberate and purposeful mode of exposition chosen by the author. In this way, both the internal logic of the exposition and a clearer academic presentation of the developed topic are ensured.

ACKNOWLEDGEMENTS

The completion of this dissertation is the result not only of my personal efforts, but also of the support, trust, and assistance of many people who, in different ways, stood by me throughout this journey.

First and foremost, I would like to express my deepest gratitude, appreciation, and love to my family. I thank them for their love, patience, understanding, and unconditional support throughout all the years during which I combined my professional commitments, academic work, and personal responsibilities. Their belief in me gave me strength in moments of doubt and exhaustion and was the firmest source of support on the way to completing this work.

I sincerely thank my supervisor for the time devoted to me, for the attention, professionalism, and valuable guidance provided throughout the entire research process. The support, patience, and critical insight were essential not only for shaping this dissertation, but also for my development as a researcher.

I would also like to thank the companies Sweco Sweden AB, Tyréns Sweden AB, and A&C Consult Bulgaria, as well as all the colleagues with whom I have worked over the years. Our joint work, the solving of real engineering problems, and the shared practical experience contributed substantially to my professional growth and to my development as a designer. A considerable part of the issues addressed in this dissertation is directly related to the lessons I have learned in engineering practice.

I express my appreciation to my colleagues from the Department of Hydraulic Engineering and Irrigation and Drainage at the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia, Bulgaria for their support, guidance, and collegial attitude. It was important to me to work in an environment in which scientific inquiry, professional dialogue, and collegiality go hand in hand.

I would like to express my special gratitude to National Railway Infrastructure Company (NRIC) for providing the opportunity to implement a trial section and for allowing the use of data that played a substantial role in the practical orientation and evidential value of this research. The opportunity to verify the scientific premises under real conditions was exceptionally valuable to me.

I also thank the companies suppliers and producers that provided data from laboratory testing programmes. Their assistance was of great importance for the analytical part of the study and for the possibility of substantiating part of the conclusions on a real experimental basis.

To all others who, in one way or another, have been part of my professional journey, I extend my sincere gratitude. Thank you for your trust, for the shared experience, for the helping hand at the right moment, and for the lessons that contributed to my development both as a successful designer and as a person.

Author:
Martin Petkov
Sofia, Bulgaria
07.2026