



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ

„СВ. ИВАН РИЛСКИ“ - СОФИЯ

МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА "ПОДЗЕМНО СТРОИТЕЛСТВО"

АВТОРЕФЕРАТ

*на дисертационен труд за присъждане на образователно-научна
степен*

доктор-инженер по научна специалност „Подземно строителство“

област на висше образование

5. Технически науки

професионално направление

5.7 Архитектура, Строителство и Геодезия

**тема: Избор на бетонови състави при изграждането на подземни
съоръжения в сложни инженерно-геоложки условия**

Докторант:

маг. инж. Борислав Трайков Борисов

Научен консултант:

проф. д-р инж. Павел Евстатиев Павлов

СОФИЯ, 2025

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Подземно строителство“ към Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 05.03.2025 г., съгласно Ректорска заповед № Р- от г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р- от г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на дд. мм. гггг. от часа в зала..... на факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Студентска и преподавателска мобилност“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет;
2. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет;
3. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет;
4. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет;
5. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет;

Резервни членове:

2. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет;
3. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет;
2. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия, Университет.

Дисертационният труд е в обем от 266 страници, като включва увод, 3 раздела за представяне на литературен обзор, теоретична основа и решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 120 литературни източници, като 91 са на латиница и 24 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 128 фигури и 42 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка към катедра „Подземно строителство“ на Миннотехнологичен факултет.

Автор: маг. инж. Борислав Трайков Борисов

Заглавие: ИЗБОР НА БЕТОНОВИ СЪСТАВИ ПРИ ИЗГРАЖДАНЕТО НА ПОДЗЕМНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В СЛОЖНИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОЖКИ УСЛОВИЯ

Тираж: 20 броя

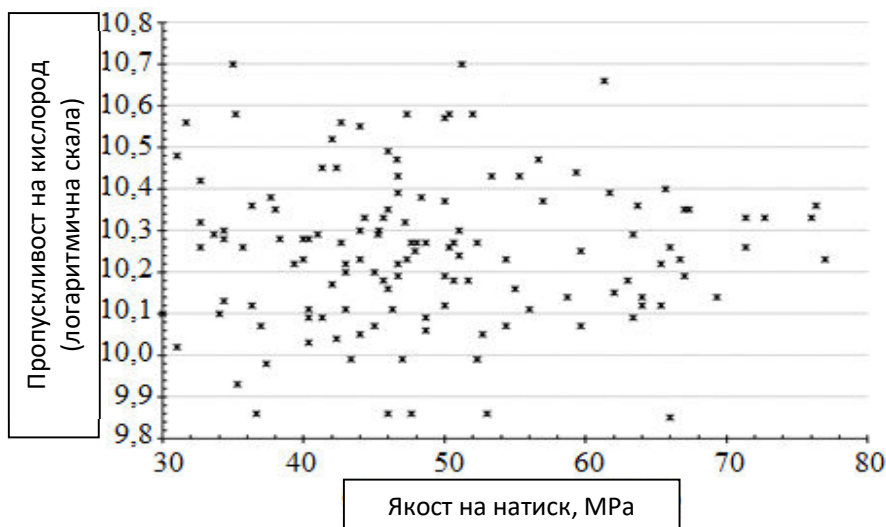
Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

I. Литературен обзор и анализ на съществуващото състояние. Актуалност на темата.

1. Обща информация

Постигането на експлоатационната дълготрайност на стоманобетонните съоръжения представлява един от основните аспекти на икономическата ефективност и устойчивост при съвременното подземно строителство. Осигуряването на стоманобетонните конструкции за необходимият времеви период предотвратява разходите за преждевременни ремонтни дейности, както и свързаните с ремонтите функционални разходи. Освен финансовите щети, следва да се отчетат и рисковете за живота и здравето на населението, както и намалената производителност на труда и екологичните, инфраструктурни и други рискове, произтичащи от аварии и ремонти на инфраструктурата.

Разгледани са основните концепции за постигане на експлоатационната пригодност на съоръженията за изискуемият експлоатационен срок. Предписващият подход (prescriptive approach/deemed to satisfy rules) търпи критики от множество експерти в световен мащаб [1], [4], [7], [8], като тенденцията е в практиката да се залага на моделиране и прогнозиране на експлоатационния живот, както и обследване и оценяване на остатъчния ресурс на съоръженията.



Фиг. 1.1. Липса на корелация между стандартната якост на натиск и пропускливостта на кислород (логаритмична скала), измерени върху изградени конструкции [8].

Някои изследователи констатирали липсата на връзка между корозионната устойчивост на бетона и якостта му на натиск, която обикновено се приема, като индикатор за корозионна устойчивост на бетона при предписващият подход (фиг. 1.1.).

Част от данните от публикувани изследвания показват и липсата на изразена корелация между минималното съдържание на цимент (и активни минерални добавки) и корозионната устойчивост на бетоните [9].

Вследствие на горното, през последното десетилетие, започна да се прилага и допълнително моделиране на процесите на увреждане на конструкциите, чрез т. нар. вероятностен подход (probabilistic approach), при който се извършва моделиране на

експлоатационната дълготрайност за даденият обект още на ниво проект въз основа на конструктивните проекти, избраните материали, строителните технологии, информацията от инженерно-геоложките и хидрогеоложките доклади, условията на експозиция, експлоатационните условия, климатичните данни и други [1], [2]. Използва се и подход базиран на постигнатите характеристики (performance based approach) [1], [2] на построените конструкции.

2. Фактори, определящи дълготрайността на стоманобетона

Дълготрайността на конструкциите от стоманобетон е функция основно от следните фактори [16]:

- Условия на околната среда;
- Рационално и адекватно проектиране;
- Характеристики на използваните материали;
- Технологии и качество на строителството;
- Инспекции, обследвания, измервания, изпитвания и оценка на състоянието на съоръженията по време на експлоатация. Поддръжка и поправки.

3. Условия на околната и експлоатационната среда

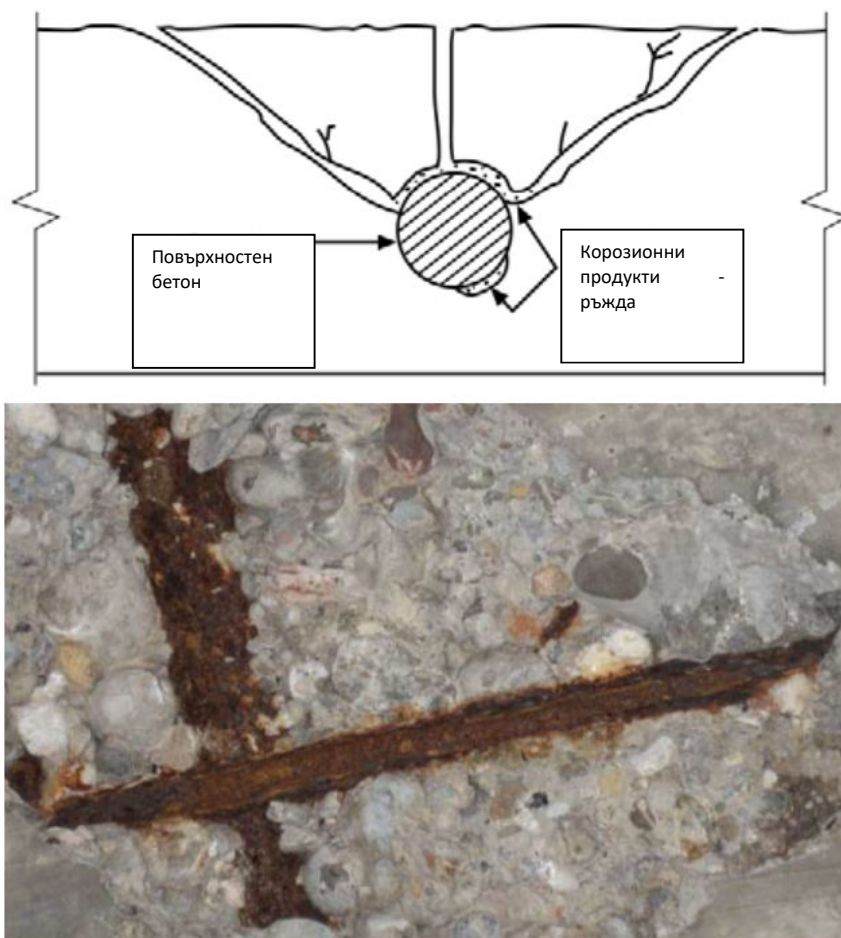
Средата, с която контактува даден материал е основен фактор, определящ типа и интензивността на корозията. Различни компоненти на обкръжаващата среда могат да бъдат критични по отношение на развитието или прекратяването на корозионната атака. Географското положение, климатичните условия по време на производството, строителството и експлоатацията също са от голяма важност. Най-общо казано, почви с висока влажност, висока електропроводимост, голям коефициент на филтрация, висока киселинност, висока концентрация на разтворени соли са най-корозионно агресивни.

4. Прогнозиране на експлоатационния живот на стоманобетонните конструкции

Проблемите с дълготрайността на стоманобетонните конструкции са свързани с широк диапазон от процеси, като: проникване на външни агресивни агенти (напр. сулфати, хлориди, киселини и др.), вътрешни процеси, възникнали поради неудачен подбор на направните суровини (напр. алкало-агрегатна реакция и забавено образуване на еtringит) и разрушителни физични въздействия, като например цикли на замръзване и размръзване, абразия. Най-голямата заплаха за стоманобетона е корозията на армировъчната стомана, обикновено водеща и до напукване и разпадане на бетонното защитно покритие.

В резултат на корозионните процеси, протичащи под въздействието на различни външни агресивни среди по повърхността на стоманобетона, настъпват съответни промени, които с течение на времето се разпространяват и във вътрешността му. Механизмите на влошаване се обуславят основно от агресивно вещество от околната среда, проникващо в бетона [18]. С времето веществото или се натрупва, докато концентрацията надвиши критичната стойност, разрушаваща бетона (напр. сулфати) или дифузира към армировката (напр. хлориди).

Следователно устойчивостта на корозия под въздействие на външна агресивна среда, до голяма степен се контролира от дебелината и качеството на бетонният защитен пласт.



Фиг. 1.5. Загуба на сечение и пукнатини, вследствие на хлоридно корозионно въздействие върху стоманобетон (PCA, 2002; Romer, 2013) [19]

Факторите усложняващи прогнозирането на експлоатационния срок включват оценката на случайните вариации в характеристиките на материалите, разнообразието от конструктивни елементи и геометрични решения в рамките на конструкциите, непостоянството в качеството на строителството и набора от агресивни агенти оказващи въздействие в различните среди, както и комплексността на вътрешните процеси на увреда.

Когато стоманата е по-близо до повърхността на бетона, тя ще бъде изложена на вредно въздействие по-скоро след контакта на съоръжението с почвите и с водите. След като стоманата бъде засегната, степента на корозия ще зависи и от наличието на кислород. Ако кислородът е в ограничени количества ще се образува т. нар. „черна ръжда“, която заема не много по-голям обем от изходната стомана и почти не причинява щети по бетона, но способства за намаляване на носимоспособността на арматурката. Когато кислородът е в по-големи количества, ще се образува т. нар. „червена ръжда“, която заема по-голям обем и би причинила и напукване и разломяване на околния бетон [24], фиг. 1.5.

5. Методики за прогнозиране на дълготрайността

Налице са следните основни подходи за оценка и осигуряване на проектния живот на подземния стоманобетон [16]:

- Предписващ подход/счита се, че отговаря на изискванията (prescriptive approach /deemed to satisfy rules);
- Вероятностен подход (probabilistic approach);
- Подход базиран на постигнати характеристики (performance based approach).

6. Цел на дисертационната работа

В резултат на извършеният литературен анализ, биха могли да се направят следните основни изводи по отношение моментното състояние на темата на дисертацията:

- Няма единна комплексна методика за моделиране увреждането на подземния стоманобетон;
- Съществуващите методи за вероятностно моделиране боравят с различни изчислителни теоретични модели и входящи данни. Съответно резултатите от моделирането варират, понякога и в значителна степен. Различните методики обхващат само някои от механизмите на разрушение и не биха могли да покрият всевъзможните комбинации от корозионни въздействия при строителство и експлоатация в агресивни условия;
- Практиката показва, че изискванията към проектирането и материалите заложи в различните действащи спецификации, ръководства и стандарти не винаги са оптимални и понякога довеждат до ненужно оскъпяване, технологични проблеми или, в някои случаи, до недостатъчно адекватна защита на някои конструктивни елементи. За определени комбинации и интензитет на въздействия не са налични конкретни предписани изисквания и съществуват ограничени данни [16,27];
- Структурата и свойствата на бетоните зависят както от рецептурите, свойствата на направните суровини, пропорциите и съвместимостта между тях, така и от качеството на строителството, вкл. полагане, уплътнение, грижи за бетона и условия за втвърдяване и набиране на якост;
- Бетоните въз основа сулфатоустойчиви цименти (SRC) могат да бъдат уязвими към образуване на таумазит (т. нар. вътрешна сулфатна атака) и не са подходящи за използване в соленоводни условия поради недостатъчната им устойчивост срещу проникване на хлоридни йони.

Целта на дисертацията е определена, като създаване на комплексна методика за осигуряване на експлоатационния срок на подземни стоманобетонни съоръжения.

Задачи на дисертационната работа

Формулирани са следните задачи на дисертацията:

1. Определяне, анализ и обосноваване на възможните механизми на увреда на стоманобетона за конкретните съоръжения, разгледани в дисертацията;
2. Преглед на теоретичните постановки и приетите фактори обуславящи различните механизми на корозия;
3. Преглед на изискванията на съществуващата приложима нормативна база за проектиране и строителство. Определяне на нормативните изисквания;

4. Моделиране на вероятностния експлоатационен срок като за входни данни са използвани определените изисквания към бетоните;
5. Въз основа на резултатите от вероятностното моделиране, извършване на проверка за възможността за оптимизация;
6. След окончателното определяне на изискванията към бетоните подбор на високоякостни и корозионно устойчиви рецептурни състави, изпълнение на пробни замеси и лабораторни тестове;
7. Извършване на сравнение и анализ на резултатите от изследванията за различните смеси, резултатите от изследването на бетони на други и по литературни данни, за да се определят взаимовръзките между състава и характеристиките на бетоните. Извеждане на основни изводи, както и насоки за ускорено определяне на подходящи бетонови състави въз основа класовете по въздействие на околната среда;
8. Изготвяне на подробен план по контрол на качеството (план за инспекции и изпитвания) с цел да се управлява техническото съответствие, по време на строителния процес и да се обезпечи експлоатационният срок на съоръженията.

II. Обща част: Стоманобетон. Материали и характеристики.

1. Основни характеристики

Стоманобетонът е изкуствен строителен материал, който се състои от бетон и стомана за усилване (армиране). Приема се, че стоманата е защитена при водороден показател рН над 11, като може да започне да корозира при стойност на рН 10, в зависимост от характеристиките на армировъчната стомана и местните физико-химични условия, когато бетонът се втвърдява.

2. Материали за производство на стоманобетон

2.1. Бетон

Бетонът е изкуствен каменоподобен материал, получен чрез втвърдяване на хомогенна смес от свързващо вещество, инертни материали, вода и специални добавки. В зависимост от условията на въздействие на околната среда, разтвори, проникващи от повърхността във вътрешността на бетона разтварят продуктите от хидратация на цимента. Това води до увеличаване на порьозността, което пък от своя страна предизвиква намаляване на якостта и трайността на бетона. Възможен е и обратният процес, когато продуктите на взаимодействие прекристализират в кухините и микропукнатините, като по този начин се засилват якостта и дълготрайността на бетоните [14, 16] – самоуплътняване (самовъзстановяване) на бетона.

2.2. Свързващи вещества за направа на бетон

2.2.1. Портландцимент

Обикновеният портландцимент е хидравлично свързващо вещество, произведено чрез смилане на клинкер, суров гипс, активни и неактивни добавки. Произвежда се, като се изпичат до границата на стопяването ситно смлени и добре смесени сурови материали – главно глина и варовик.

2.2.1.1. Химичен и минерален състав на клинкера

Химически състав на портландциментовия клинкер.

В състава на цимента влизат следните основни окиси: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Той съдържа освен това MgO и CO_2 . В много малки количества – около 1 % или част от процента, се съдържат титаниев двуокис (TiO_2), манганов окис (MnO) и др.

Калциевият окис (CaO) е най-главната съставна част на клинкера. Неговото количество се движи в границите от 64 до 67 % от състава на този материал.

Минерален състав на клинкера.

При процесът на изпичане се осигуряват условия за насищането на CaO с останалите окиси - SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , при което се образуват следните сложни минерали на клинкера:

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - (\text{C}_3\text{S})$ – трикалциев силикат (алит);

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - (\text{C}_2\text{S})$ – двукалциев силикат (белит);

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{C}_3\text{A})$ – трикалциев алуминат;

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - (\text{C}_4\text{AF})$ – четирикалциев алумоферит.

Сумарното съдържание на алит и белит е около 70 – 80 %. Наред с кристалните вещества в клинкера се съдържа от 6 до 10 % аморфно вещество.

2.2.1.2. Втвърдяване на портландцимента

При замесване с вода цимента се втвърдява. Физико-механичните и физико-химичните процеси, които протичат при втвърдяване на цимента са доста сложни. Тяхното изучаване се затруднява от полиминералния състав на циментния клинкер.

2.2.1.3. Екзотермия на цимента

Под екзотермия се разбира свойството на свързващите вещества да отделят топлина при взаимодействието им с водата в процеса на втвърдяване. Втвърдяването на цимента е съпроводено с отделянето на големи количества топлина. При елементи с малка дебелина, отделеното количество топлина е полезно, като спомага за по-доброто протичане на втвърдяването на бетона.

2.2.2. Вода

Водата умокря останалите компоненти, при което те се свързват в една обща бетонна смес. Водата придава подвижност на бетонната смес. Оказва влияние върху свойствата на бетоновата смес и бетона преди всичко със своето количество, но и с разтворените в нея вещества. Излишното количество вода създава пори в циментния камък и влошава свойствата на бетона.

2.2.3. Добавъчни (инертни) материали за бетон

Добавъчните материали са най-голямата по обем съставна част на бетона и оказват определено влияние върху неговите физико-механични свойства, дълготрайност и себестойност. Ползват се дребен и едър добавъчен материал. Контролират се редица техни характеристики между които съдържанието на отмиваемите примеси и на сулфати и реакционна способност към алкални окиси (R_2O).

2.2.4. Добавки към бетона

Основните химически добавки са: пластифициращи, въздуховъвличащи, ускоряващи, противозамръзващи, уплътняващи, пластифициращо-въздуховъвличащи, ускоряващо-пластифициращи, инхибиращи добавки.

2.2.5. Активни минерални добавки

Активните минерални добавки не са самостоятелни свързващи вещества, но когато се смесят с варова каша и вода се свързват и втвърдяват, като образуват устойчиви хидравлични вещества, подобни на цимента. По произход се делят на изкуствени и естествени.

2.2.5.1. Гранулирана (бързоохладена) доменна шлака

ГДШ подобрява обработваемостта, дълготрайността, водонепропускливостта и якостта на бетона, намалявайки порьозността му. Редуцира температурата генерираната от хидратационните процеси при втвърдяване на бетона, предотвратявайки напукване и свиване. Повишава устойчивостта на алкало-силициева реакция, проникване на хлориди и сулфатното корозивно действие.

2.2.5.2. Летяща пепел

Летящата пепел (ЛП) е фино диспергиран материал с малък размер на частиците. В портландциментовите бетони ЛП подобрява реологията и дългосрочните характеристики. Обичайното заместване на цимент с ЛП е до 30 %, но успешно са разработвани смеси и с до 70 % добавена ЛП [39, 40].

2.2.5.3. Микросилициев прах

С помощта на микросилициевият прах (МСП) се постигат бетони с висока якост, висока устойчивост на износване, корозионна устойчивост, висока структурна плътност, непроницаемост и хомогенност.

2.3. Свойства на бетона

2.3.1. Структурообразуване и структура на бетона

Структурата на бетона, образувала се след втвърдяването на бетонната смес е съставена от добавъчните материали и циментния камък, свързал техните зърна, както и от празнини с различни размери и произход. Макроструктурата е представена от едър добавъчен материал – циментно-пясъчен разтвор – едри пори и празнини; микроструктура, представляваща строежът на компонентите на бетона, както и строежът на контактната зона между тях. Порите в бетона са съществен елемент от неговата структура и оказват определено влияние върху свойствата му.

2.3.2. Водонепропускливост на бетона

Бетонът е капилярно-поресто тяло, като порите са причина за дифузията на вода и течности в обема му. Факторите, оказващи влияние върху водонепропускливостта на бетона, са водоциментното отношение, количеството на цимента, видът на цимента, степента на уплътнение, съдържанието на финодисперсни добавки, условията на втвърдяване, възрастта на бетона, напрегнатото и деформираното състояние на конструкцията и др.

2.3.3. Корозионната устойчивост на бетона

Корозионна устойчивост е способността на бетона да запазва свойствата си и да не се разрушава при действието на агресивни среди [35, 48]. Отнася се преди всичко за устойчивостта на свързващото вещество (цимент и активни минерални добавки) в агресивна среда.

2.3.4. Обследване корозионната устойчивост на бетона:

Основните тестове с цел оценка на корозионната устойчивост на бетоните са: дълбочина на проникване на вода под налягане, определяне на абсорбция на вода на втвърден бетон, определяне устойчивостта на втвърден бетон на проникване на хлориди, устойчивост на бетон на сулфати.

2.4. Корозионна устойчивост на бетона и връзката с неговите характеристики и състав

Обикновено се приема, че корозионната устойчивост на определен бетон се определя от качеството на инертния материал, типа и класа по якост на цимента, съдържанието на цимент, използването на подходящи минерални и химически добавки, водоциментното отношение, якостта на бетона, плътността на бетонната структура, качеството на строителството и др.

Част от горните допускания се поставят на съмнение от някои изследователи (виж. фиг. 1.1.). Например през 1999 г. Работна група на Бетоново общество на Обединеното кралство (Working Party of The Concrete Society)[9] стига до заключението, че съдържанието на цимент няма съществено влияние върху скоростта на карбонизация и следователно времето до започване на корозия на армировката. Групата не установява достатъчно данни за категорични препоръки за определяне на минималното съдържание на цимент за бетони, подложени на въздействие на хлориди.

3. Корозия на стоманобетонните конструкции и съоръжения под влиянието на външни агресивни среди, механични въздействия и вътрешни неблагоприятни фактори

3.1. Механизми за корозионно влошаване на характеристиките на бетона

Четири основни типа разрушение на бетона са дефинирани в ACI 365.1 („Прогнозиране на експлоатационния живот“) [54], както следва:

- Тип I - Химично разрушение - промяна на качествата на бетона чрез реакция, която може да приеме три форми: хидролиза на циментовият камък чрез мека

вода, реакции на обмен на катиони между флуиди и циментовият камък и реакции, които водят до образуването на разширяващи обема си продукти;

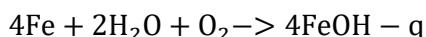
- Тип II – Механично разрушение, което може да доведе до напукване и изветряне на бетоновите повърхности.;
- Тип III – Термични (температурни) повреди, които могат да доведат до пукнатини и забавено образуване на еtringит (хидросулфоалуминат);
- Тип IV - Комбиниран ефект: Това е комбинация от няколко причини (химични, механични и термични).

Следователно могат да се отделят следните по-основни механизми за влошаване на характеристиките на бетона:

- Алкална реакция на агрегатите;
- Сулфатно въздействие;
- Киселинно въздействие;
- Микробиологично въздействие;
- Сулфидно въздействие;
- Въздействие от въглероден двуокис;
- Излужване;
- Абразия.

3.2. Корозия на армировката

Известно е, че всяко вещество се стреми към своето изходно състояние, тъй като от енергийна гледна точка тази форма е най-устойчива. Корозията на металите е химична или електрохимична реакция, протичаща на фазовата граница „метал/заобикаляща среда“, в резултат на което металът преминава в окислено (йонно състояние) [58]. Процесът на корозия при желязото се описва с уравнението [3]



При процеса се освобождава енергия q , използвана за производството на желязото.

Влошаването на стоманата вложена в бетона е процес на корозия, който може да бъде иницииран от един или повече от долните механизми:

- Въздействие от хлориди: наличието на критична концентрация на хлоридни йони при повърхността на армировката ще причини локално разпадане на пасивния слой дори при високо pH;
- Въздействие от сулфиди: сулфидните йони също могат да предизвикат корозия на арматурата по аналогичен начин както хлоридните йони;
- Карбонизация: постепенното проникване на атмосферния въглероден диоксид в неводонаситен стоманобетон неутрализира защитната алкална среда около вградената стомана. В присъствие на влага, стоманата корозира.

3.2.1. Основни реакции

Основната причина за появата на корозия на армировъчната стомана е вследствие на електрохимичен процес. Корозията представлява електрохимична реакция или по-точно, две полуклетъчни реакции:

За анода $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$

За катода $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{OH}^-$

Отделят се следните видове корозия на армировката:

- Микроклетъчна корозия;
- Едроклетъчна корозия;
- Корозия в ниско кислородни среди;
- Корозия в зоната на капилярно покачване;
- Корозия в зоната на конвекция;
- Електрична корозия от блуждаещи токове;
- Корозия на армировката по пукнатини.

4. Моделиране на корозионните процеси на стоманобетонните съоръжения

4.1. Общи сведения

Проникването на хлоридите във водонаситен бетон обикновено се моделира посредством използването на втория закон за дифузия на Адолф Фик (Adolf Fick), въпреки че други механизми на транспорт като абсорбция, осмоза, капилярно действие и конвекция имат своята роля особено при периодично намокряне и изсъхване на стоманобетона.

Едно от основните предизвикателства при разработването и прилагането на модели за корозия на стоманобетон е значителния брой на участващите променливи:

- рецептурата на бетона и неговите съставни материали;
- физическите свойства на бетона;
- условията на свързване и втвърдяване в ранната възраст на бетона;
- условията на експозиция (въздействие на агресивни среди);
- качеството на строителството;
- използването на защитни мерки като покрития, химически и минерални добавки и др.

4.2. Експлоатационна дълготрайност

Съгласно Еврокод 1 [75] и Наредба № 3 от 21 юли 2004 г. за основните положения за проектиране на конструкциите на строежите и за въздействията върху тях [76] съществуват две групи гранични състояния. Граничните състояния от първа група

(крайните гранични състояния) са свързани с безопасността на хората и сигурността на конструкцията и водят до загуба на носимоспособност или до пълна непригодност за експлоатация на конструкцията.

Граничните състояния от втора група (експлоатационните гранични състояния) са свързани с функционирането на конструкцията или на нейните елементи, с комфорта и с външния вид на строежите, вследствие на което се затруднява нормалната им експлоатация.

4.3. Моделиране на експлоатационната дълготрайност

При моделирането на дълготрайността може да се използва същият принципен подход, както при статическия анализ. За да се покрие изискването за експлоатационен срок трябва да е изпълнено долното уравнение за граничното състояние на конструкцията:

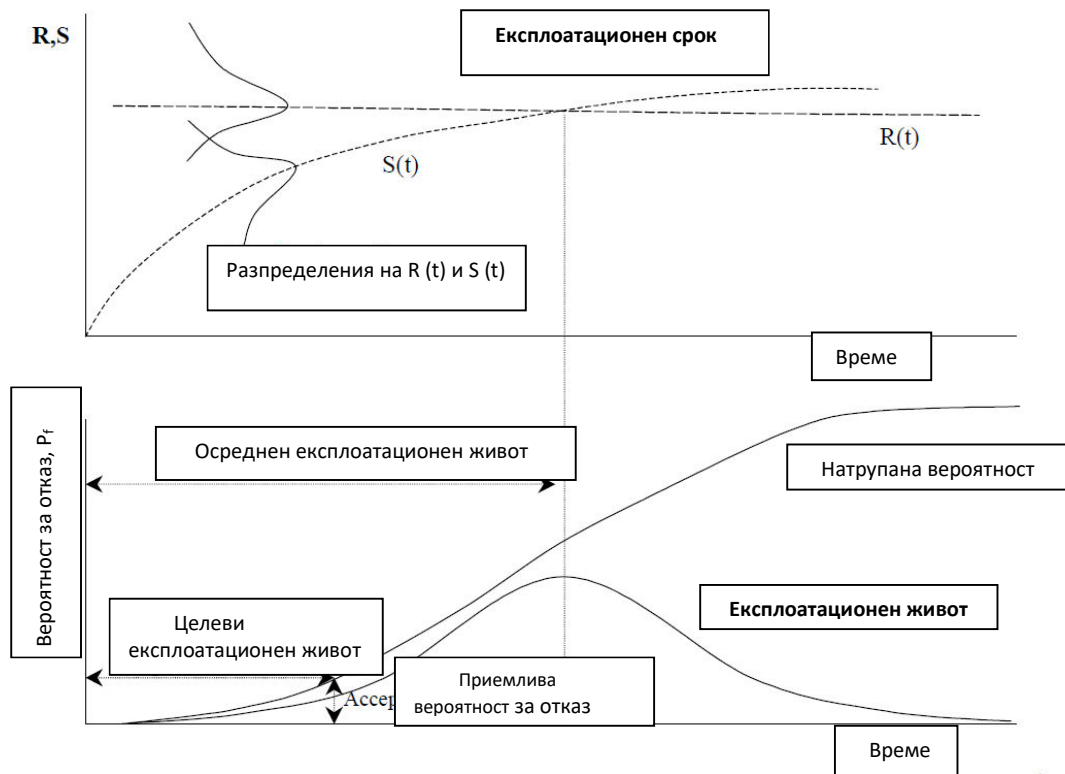
$$R(t) - S(t) \geq 0$$

Тоест, съпротивлението R трябва да бъде по-голямо или равно на натоварването S за определен период от време t . Граничното състояние може да бъде прието, като функция на важни характеристики на съоръженията като: носимоспособност, пригодност, функционалност, естетичност и др.

4.3.1. Вероятностно моделиране

Експлоатационния живот може да бъде прогнозиран с помощта на единични величини или чрез използването на осреднени стойности за входни параметри. Макар и привидно логичен подход, практиката да се използват средните стойности на входните параметри за изчисляването на експлоатационния живот не е коректна. Това важи в случаите на работа с нелинейни системи, както следва от неравенството на Jensen [77].

При това фактори като характеристиките на околната среда и физическите свойства на материалите могат да варират значително. Съответно съпротивлението, натоварването и експлоатационният срок са неизвестни, които са по-добре представени чрез своите разпределения. Следователно експлоатационният срок може да бъде прогнозиран чрез вероятностен (стохастичен) метод [25]. Тази концепция е илюстрирана на Фиг. 2.27.



Фиг. 2.27. Концепция за проектен експлоатационен период съгласно Siemes & Rostam [25]

В горната половина на горната фиг. 2.27. е показано нарастващото натоварване $S(t)$ и съпротивлението $R(t)$ оставащо постоянно с течение на времето. Представени са разпределенията на двете величини във всеки даден момент. Прекъснатите линии представляват техните средни стойности във времето. Средният експлоатационен живот се получава от пресечната точка на двете линии. Съществува относително малка вероятност за отказ в по-ранен период, представена от припокриването между двете разпределения. Вероятността от сериозна повреда нараства с течение на времето, както е показано в долната половина на фиг. 2.27. Приемливата вероятност за възникване на повреда в рамките на проектния експлоатационен срок се определя от естеството и степента на отговорност на съоръжението. Когато потенциалните последствия от отказ, на конструкцията - са големи, за гранично състояние се приема по-ниска вероятност за отказ. Съответно т. нар. среден експлоатационен срок може да бъде по-голям от проектния експлоатационен срок, което зависи и от вида на разпределенията за R и S .

Прогнозирането на дълготрайността може да бъде изразено по следните два начина [78]:

Планиран експлоатационен период (Intended service period). В този случай определеното граничното състояние може да не бъде достигнато в рамките на целевия (планирания) експлоатационен живот. Подходът е както при конвенционалното конструктивно проектиране и е представен в горната част на фиг. 2.27. Концепцията може да бъде изразена с формулата:

$$P_{f,t} = P\{R(t) - S(t) < 0\} \quad P_{\text{target}} = \Phi(-\beta)$$

$P_{f,t}$ е вероятността от отказ (достигането на неприемливо състояние) на конструкцията в рамките на проектния експлоатационен срок, t_g ;

P_{target} е приетата максимална стойност на вероятността от отказ;

Φ е функцията на стандартното нормално разпределение;

β е индексът на надеждност. Представлява броят на стандартните отклонения от средната стойност на нормалното разпределение на случайните величини. Площта под кривата представлява вероятността от повреда/отказ.

Експлоатационен живот (Lifetime) - при този подход надеждността на конструкцията е обвързана с вероятността проектния експлоатационен срок да бъде надвишен.

Вероятността за отказ е представена от израза:

$$P_f = P\{L \leq t_g\} [P_{\text{target}} = \Phi(-\beta)]$$

$P_{f,t}$ е вероятността от отказ (достигането на неприемливо състояние) на конструкцията в рамките на проектния експлоатационен срок, t_g ;

P_{target} е приетата максимална стойност на вероятността от отказ.

Φ е функцията на стандартното нормално разпределение;

β е индексът на надеждност. Представлява броят на стандартните отклонения от средната стойност на нормалното разпределение на случайните величини. Площта под кривата представлява вероятността от повреда/отказ.

Коефициент на безопасност за експлоатационен живот (Lifetime)

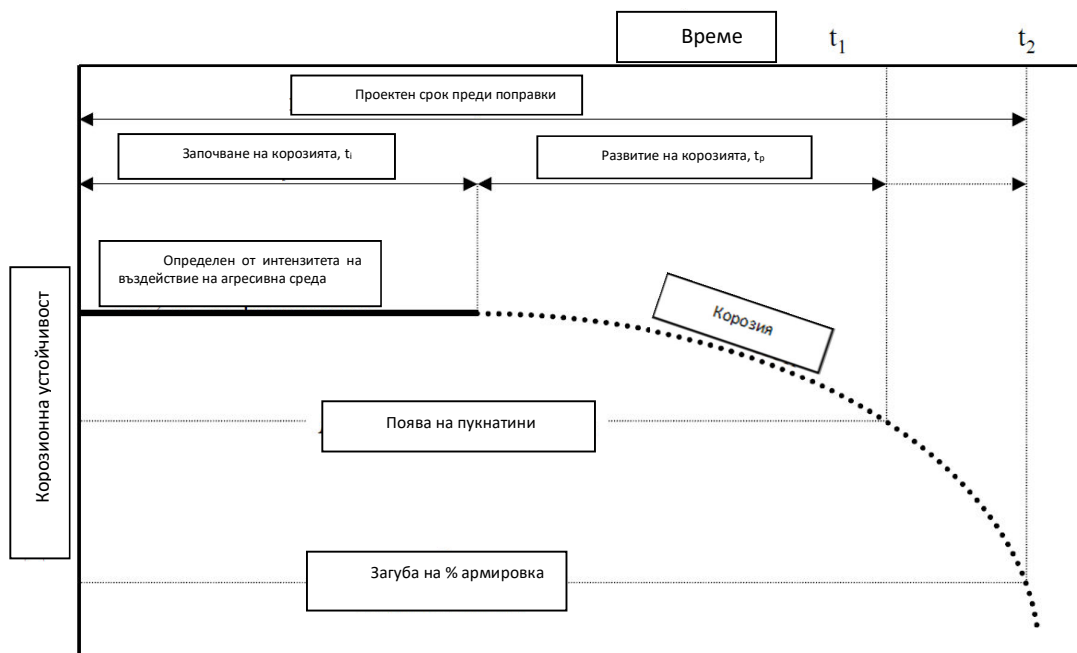
Вместо приложение на вероятностен подход може да се използва коефициент на безопасност. Проектният експлоатационен срок t_d в този случай може да бъде представен, като:

$$t_d = \gamma_t t_g$$

γ_t е коефициента на безопасност за проектния експлоатационен срок.

4.3.2. Методики за съставяне на модели за симулиране на корозионните процеси и прогнозиране на експлоатационната дълготрайност на съоръженията

Корозията на стоманобетона условно може да бъде разделена на два периода. Период на започване, през който настъпва въздействие на агресивна среда. Следва периода на разпространение, обхващащ началото на корозията до приетото гранично състояние на дълготрайност.



Фиг. 2.28. Модел на корозия съгласно Tuutti [21]

Проектния експлоатационен срок се определя от следното уравнение:

$$t_d = t_i + t_p$$

4.3.2.1. Входящи данни

Входните параметри са от решаващо значение за получаването на максимално достоверни резултати от прогнозното моделиране. Следните фактори са определящи за периода на започване на корозията:

- дебелина на бетонното покритие;
- състав на бетона и характеристики на използваните направни суровини;
- грижа за бетона и условия на втвърдяване;
- качество на строителството;
- експозиция на агресивни среди;
- концентрация на хлориди на повърхността на бетона;
- потенциал на бетона за свързване с хлоридите;
- прагово ниво на хлориди (зависи от редица фактори, като - тип цимент, относителна влажност, вид на армировката, използване на химически и минерални добавки, наличие на повърхностни покрития и т. н.);
- използването и въздействието на допълнителни защитни мероприятия като покрития, химически и минерални добавки и др.

Скоростта и интензитета на корозия зависят от:

- относителната влажност, в зоната, на армировката;
- наличието на кислород;
- концентрацията на хлоридни йони при армировката.

4.3.2.2. Прогнозиране на времето до започване на корозия

Хлоридните йони навлизат и се придвижват в бетона чрез следните механизми:

- дифузия;
- капилярно действие, абсорбция, осмоза (когато бетонът не е напълно водонаситен);
- хидростатично налягане;
- проникване през пукнатини и фуги.

Дифузията е основният механизъм за проникване на хлориди, когато се приеме, че бетонът е водонаситен. Навлизането на хлорид чрез дифузия обикновено се моделира с помощта на втория закон на Fick:

$$C_x - C_b = (C_s - C_b) \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right) \right]$$

C_x - съдържание на хлориди на дълбочина x ;

C_s - съдържание на хлориди на повърхността на бетона;

C_b - фоново съдържание на хлориди (от суровините на бетонната смес);

D - частен коефициент на дифузия на хлориди;

t - период на въздействие (експозиция).

Коефициента на дифузия намалява с времето поради продължаващата хидратация на цимента. При бетони базирани на ОПЦ се наблюдава незначителна промяна след първите 12 месеца, но при бетони с ГДШ и ЛП може да има подчертан спад. Зависимостта на коефициента на дифузия във времето може да се покаже с помощта на израза [79]:

$$D = D_0 \times \left(\frac{t}{t_0} \right)^n$$

Където D и D_0 са коефициентите на дифузия след времеви периоди t и период t_0 , а n е параметър зависещ от вида на цимента [80].

4.3.2.3. Ниво на хлориди по повърхността на бетона

Установено е също, че нивото на повърхностния хлорид се увеличава с времето при съоръжения потопени във вода [81]. Предложени са следните уравнения [54]:

$$C_x = kt \left[\left(1 + \frac{x^2}{2D_t} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2(D_t)^{1/2}} \right) - \left(\frac{x}{(D_t)^{1/2}} \right) e^{-x^2/4D_t} \right]$$

$$C_x = k\sqrt{t} \left[e^{-x^2/4D_t} - \left(\frac{x\sqrt{\pi}}{2D_t} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2(D_t)^{1/2}} \right) \right) \right]$$

Наличен е и логаритмичен израз за зависимостта от времето на C_{sa} [25]:

$$C_{sa}(t_{exp}) = A \ln(t_{exp} + \Delta t_{ini}) + B$$

Където t_{exp} е периода на въздействие, Δt_{ini} е началното време на свързване, а A и B са константи.

4.3.2.4. Съдържание на хлориди в бетона

Свободните хлориди, участващи в течната фаза на бетона, предизвикват корозия на армировката. Според Sergi et al [82], връзката между свободните и свързаните хлориди може да бъде представена от адсорбционната изотерма на Langmuir:

$$S_{cl} = \frac{\alpha C_{cl}}{1 + \beta C_{cl}}$$

където S_{cl} е концентрацията на свързаните хлориди и C_{cl} е концентрацията в разтвора в порите. α и β са константи за даденият цимент, зависещи от способността за свързване на цимента и наличието на включени хлориди.

4.3.2.5. Симулиране на навлизането на хлориди

Когато строителната конструкция е обект на въздействие на цикли на намокряне и изсушаване, бетонът може да се подели условно на различни зони. Където бетонът е близо до пълно насищане, преобладаващият транспортен механизъм е дифузия. Транспортните механизми, различни от дифузията обуславят навлизането на хлориди във външната зона повлияна от циклите на намокряне и сушене. Дълбочината на външната зона зависи от агресивността на средата и свойствата на бетона. Модели на комплексен транспортен механизъм в частично наситен бетон са описани в литературата, но тяхната употреба изисква подробна информация на специфичните за обекта условия и широк набор от свойства на материалите, които обикновено не са на известни при проектирането.

Приема се [83], че законът на Фик (Fick) може да се модифицира за приложение в условия, при които бетонът не е водонаситен, както следва:

- Използване на подходящи корекционни фактори за намаляване на коефициента на дифузия;
- Модифициране на фактора на възрастта на бетона за коефициента на дифузия;
- Използване на експериментално установени максимални нива на повърхностни хлориди.

4.3.2.6. Прагови нива на хлориди

Няма универсална стойност за минималното съдържание на хлориди (праговото ниво на хлориди) в бетона, необходимо за започване на корозия.

4.3.2.7. Моделиране на периода на разпространение

Продължителността на периода на разпространение може да се предвиди по следните начини:

1. Прогнозиране степента на разпространение на корозията, като функция от класа на въздействие и контролирани параметри;
2. Определяне на интензитета на корозията, чрез пробни образци или такива извадени от съществуващи конструкции;
3. Емпиричен анализ на параметри, за които е известно, че обуславят корозионните процеси, като: съдържание на хлориди, галванични ефекти, образуване на корозионни продукти, наличие на кислород, устойчивост на бетона, въздействие на околната и експлоатационната среда, възраст на бетона и др.

4.3.2.8. Влияние на температурата върху започването и разпространението на корозията

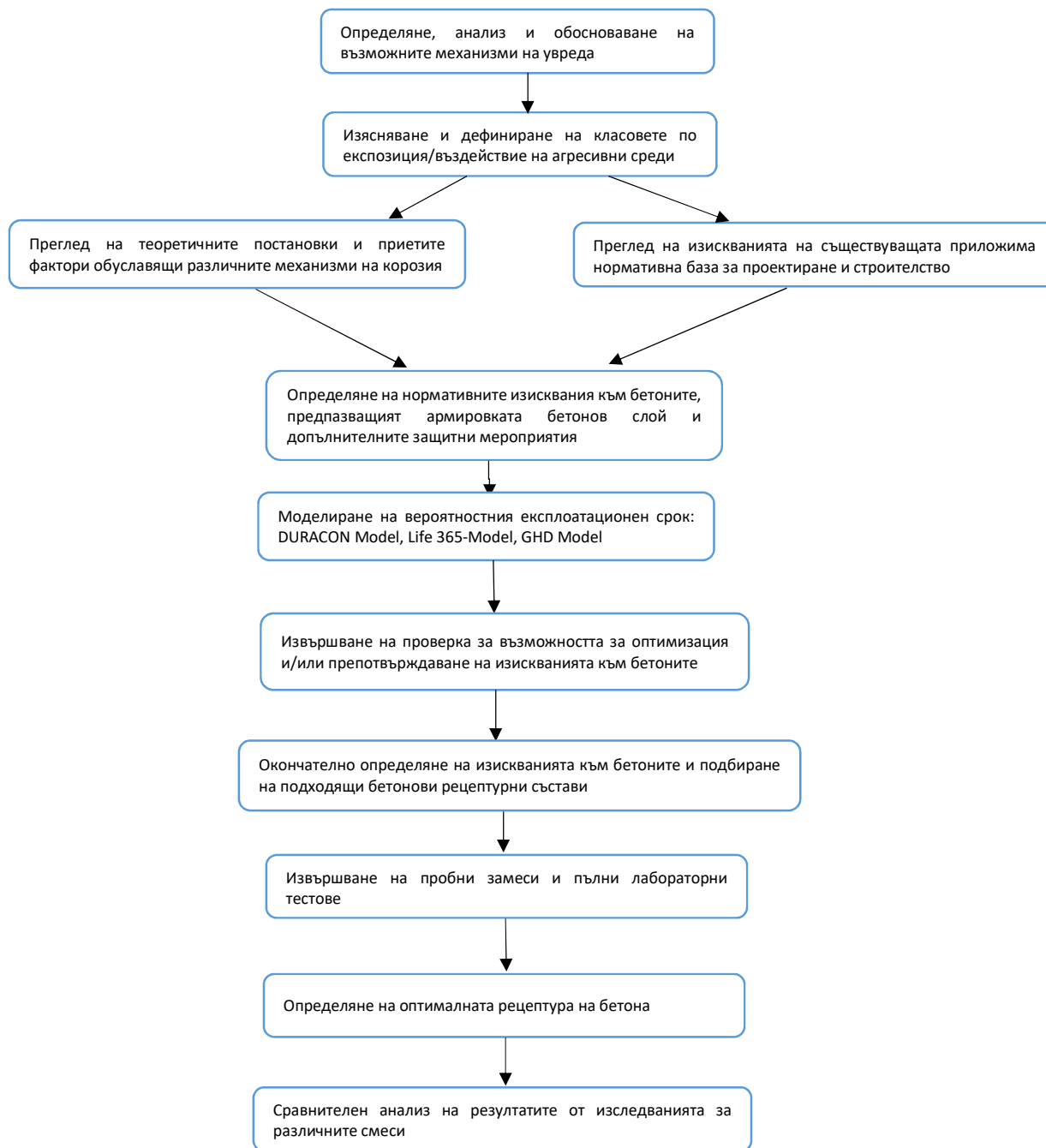
Температурата влияе на скоростта върху периодите на започване и на разпространение на корозията. Често се приема, че повишаването на температурата с 10°C удвоява скоростта на корозията [92].

III. Специална част

1. Обща информация

Дисертацията разглежда изискванията за дълготрайност на стоманобетонни тунелни крепежни тръби за изграждане на хидротехнически тунел, за пренос на отпадни и канализационни води в района между гр. Месаид и гр. Ал Уакра, южно от гр. Доха, Катар.

2. Предложена комплексна методика за осигуряване на експлоатационния срок на подземни стоманобетонни съоръжения



Фиг. 3.2. Предложена комплексна методика за осигуряване на експлоатационния срок.

3. Околна среда и условия на експозиция

3.1. Условия на експозиция

3.1.1. Геоложка, хидрогеоложка и геохимична обстановка

Инженерно-геоложкият и хидрогеоложки доклад [16] предоставя следната информация относно химичния състав и другите характеристики на почвата:

- Слоевища от варовикови и шистови скали с гипсови прослойки;
- рН: 7,6 до 9,3;
- Влажност: 8 % до 17 %;
- Съдържание на хлориди: от 100 до 40 850 ppm;
- Съдържание на сулфати: от 100 до 5 750 mg / l като SO₄;
- Съдържание на магнезий: от 700 до 109 400 mg / l;
- Нива на подземните води: от 1 m до 17 m под кота терен;
- Мобилност на водата: в диапазона от 1 до 8 x 10⁻⁶ m/s (подвижна).

Крепещата конструкция на хидротехническите тунели ще бъде разположена преобладаващо под нивото на подземните води.

Резултатите от химичните изпитвания за подземните води [16] са обобщени по-долу:

- рН: 7,3 до 8,4;
- Съдържание на хлориди: от 2 600 до 133 540 mg / l;
- Съдържание на сулфати: от 2 100 до 15 800 mg / l;
- Съдържание на магнезий: от 300 до 8 300 mg / l.

3.1.2. Вътрешна експлоатационна среда на канализацията

Вътрешните повърхности на съоръженията се очаква да бъдат изложени на въздействие със следните характеристики:

- рН: от 5,0 до 8,0;
- Температура: от 15 до 50° C;
- Съдържание на хлориди: от 200 до 800 mg / l;
- Съдържание на сулфати: от 250 до 500 mg / l;
- Съдържание на амониак: от 15 до 38 mg / l.

В тунелите се очакват високи нива на съдържание на сероводороди, което да създаде сериозен риск от биогенна корозия на метали и бетонни повърхности.

3.1.3. Водна скорост

Съоръженията са предвидени с максимална скорост на потока до 2,5 m/s. Канализацията е проектирана така, че да се постигне самопочистване и да се сведе до минимум натрупването на тини [16].

4. Метод за изграждане на тунелите

Тунелите се изпълняват с т. нар. микро-тунелно-пробивни машини - mTBM (и крикови подстанции, разположени в шахтите за достъп. Тунелната облицовка се състои от стоманобетонни крепежни тунелни тръби. Тунелната пробивна машина се приблудва посредством преси, като едновременно прокопава, изземва и изнася скалната маса. След изпълнението на един напредък (равен на дължината на една крепежна тунелна тръба) в шахтата се спуска нов крепежен елемент, който се поставя между разпределителния пръстен и тунелната пробивна машина. След това работният цикъл се повтаря. Предварително изготвените тръбни елементи са проектирани с вътрешен диаметър 1,6 m, 3 m дължина, вътрешна облицовка от усилено фибростъкло (GRP) и външно защитно мазано покритие. Междината между скалният масив и инсталираните тръби се предвижда да бъде инжектирана с циментов разтвор.

5. Анализ на рисковете и осигуряване на проектния живот

5.1. Преглед на изискванията на приложимите стандарти и технически спецификации

5.1.1. Общи положения

Приложимите спецификации, стандарти и ръководства са: Катарската строителна спецификация 2014 (QCS 2014) [38] с някои специфични промени и допълнения, Еврокод и европейски нормативи, британски ръководства за проектиране на тунели (British Tunnel design guides), ISO стандарти, кодове на Американско общество за изпитване на материалите (ASTM), ръководства на Американски бетонен институт (ACI), доклади на Общество по бетон (CS), доклади на CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), британски, канадски и австралийски стандарти за стоманобетонни тунелни тръби. Основните проблеми с корозионната устойчивост и респективно дълготрайността на разглежданите канализационни тунелни конструкции са свързани с излагането на агресивно външно въздействие от засолените подземни води и почви, както и с аеробна биогенна корозия, по вътрешните канализационни повърхности, причинена от водородни сулфиди.

5.2. Изисквания към техническите характеристики на тунелните крепежни тръби

Изискванията за постигане на проектния експлоатационен срок на стоманобетонните крепежни елементи, които са заложи в приложимите стандарти и спецификации са обобщени в долната таблица.

Таблица 3.8. Минимални изисквания за дълготрайност на канализационни тунелни тръби

Тунелни крепежни тръби	QCS 2010	EN 206/BS 8500	CS 163
QCS клас по Експозиция/Въздействие - Външно	3/4	НП	НП
QCS клас по Експозиция/Въздействие - Вътрешно	4/4	НП	НП
Клас по сулфатно въздействие	НП	XA3, AC-5ms	S4
Клас по хлоридно въздействие	НП	XD3	агресивен
Минимален клас на бетона	C40/50 (C55/65*)	C32/40	C50/60
Макс. В/Ц отношение	0,40	0,40	0,35
Мин. съдържание на цимент kg/m ³	370	380	400
Тип цимент	Не е специфициран	IIIB	E**
Мин. бетонно покритие - външно	>25	45 +5 Δс = 50	40 +5 +5 Δс = 50
Защитно покритие - външно	400 μm епоксидна смола с каменовъглено катранено покритие	Мазано покритие	Мембрани или плоскости
Мин. бетонно покритие - вътрешно	>25	30 +5 Δс = 35	НП
Защитно покритие - вътрешно	PVC облицовка или GRP (вътрешен слой 2 mm винил естер)	GRP вътрешен слой	НП

Където:

* S0811 Раздел 2.3(g)(iii)

** CS 163 цимент тип E – три компонентна смес (съгласно таблица 2)

IIВ-V: 21-35% ЛП, IIIА: 36-65% ГДШ, IIIВ: 66-88% ГДШ

5.2.1. Определени нормативни технически изисквания към тунелните крепежни елементи

Въздействията на околната среда, на които са изложени крепежните тръби, за тунелите, са класифицирани като клас 3 и 4, съгласно Националната Строителна Спецификация на Катар (QCS) [38]. Тунелните крепежни елементи ще бъдат изложени на външно и вътрешно агресивно въздействие.

Таблица 3.9. Обобщение на класовете по въздействие на средата и агресивните агенти

Местоположение	Класове по въздействие	Основни агресивни агенти	Допълнителни фактори, оказващи влияние
Подземни външни повърхности	Клас 3 (QCS:2010) Клас 4 (QCS:2010) XD3, XA3 (BS 8500-1:2015) AC-5ms (ACEC)	Сулфатно въздействие Високи нива на магнезий в почвите и подземните води Почви и подземни води с високи нива на съдържание на хлориди	Температурни пукнатини Напукване поради крикови и други инсталационни напрежения, Проникване на хлориди, корозия на армировката Качество на бетона
Подземни вътрешни повърхности	Клас 3 (QCS:2010) XD3, XA3 (BS 8500-1:2015)	Хидрогенна сулфидна атака от канализационната експлоатационна среда	Пукнатини от съсъхване, ерозия и абразия течове Забавено образуване на етрингит

Таблица 3.10. Изисквания към бетонната смес

Рецептур ен състав	Мин. клас на бетона	Макс. В/Ц отношение	Мин. Съдържа ние на цимент kg/m ³	Тип цимент	Пропорции на циментните материали	Химически добавки
1	C 55/65	0,35	400	ПЦ/ЛП/МС	ПЦ 55-70 % ЛП 25-35 % МС 5-10 %	Водоредуцираща Суперпластификатор
2	C 55/65	0,35	400	ПЦ/ГДШ/МС	ПЦ 25-55 %	Водоредуцираща

					ГДШ 40-65 % МС 5-10 %	Суперпластификатор
--	--	--	--	--	--------------------------	--------------------

Където:

Рецептурен състав 1 и 2 – предварително изготвени тунелни тръби

ПЦ - обикновен портландцимент (съгл. ASTM тип 1 или 2)

ЛП - летяща пепел

МС - силициев прах

ГДШ - гранулирана доменна шлака

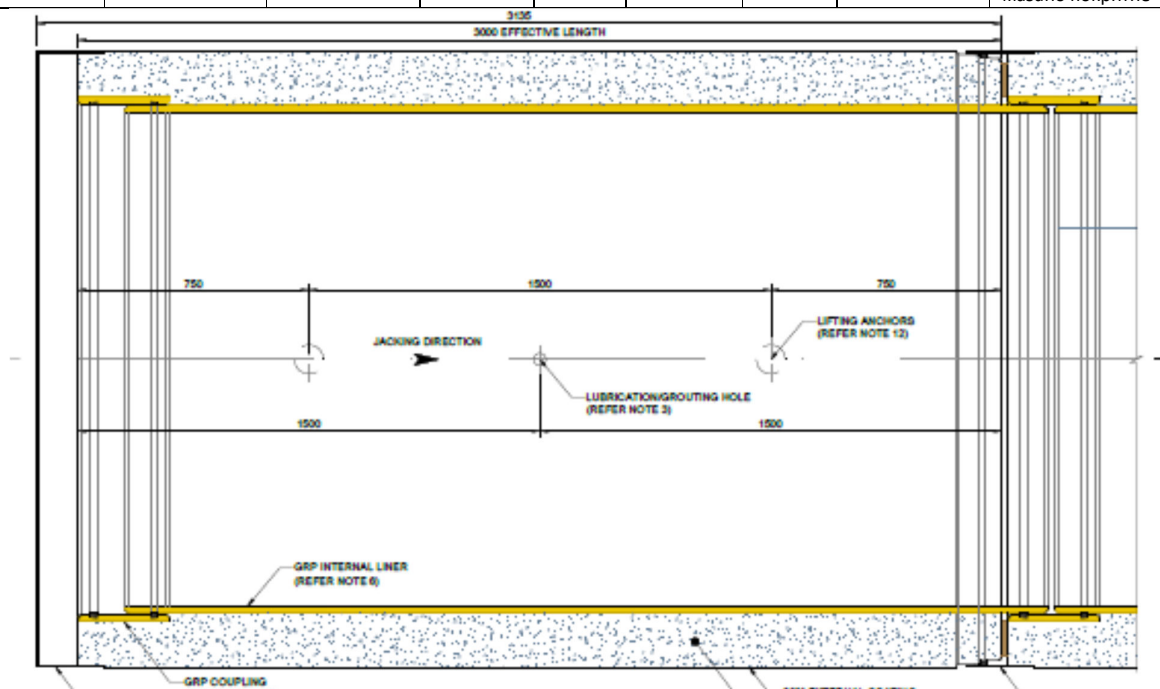
СУЦ - сулфатоустойчив цимент (съгл. ASTM тип 5)

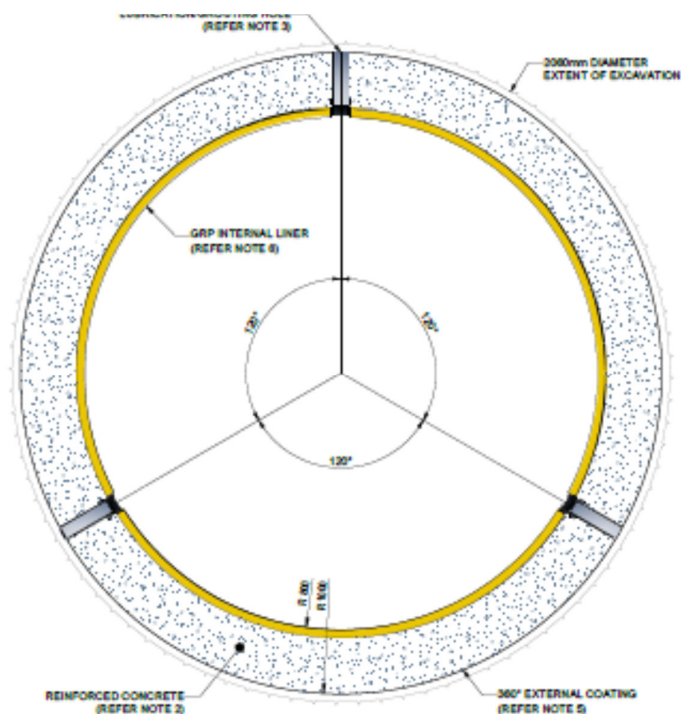
Таблица 3.11. Мероприятия за допълнителна защита

Тип	Описание
A	Облицовка от усилено фибростъкло, винилестерна смола (съгласно QCS 2010, раздел 8, част 4).
B	Висока степен на издръжливост, 100 % защита от абразия с твърди частици и химически устойчиво епоксидно покритие, нанесено мин. на два слоя с минимална обща DFT от 400 μm (за бетонови тунелни крепежни тръби). Съгласно QCS 2010 раздел 8, част 3.
F	Епоксидно/полиуретаново покритие съгласно QCS 2010, раздел 5, част 14 с минимално общо DFT от 400 μm
G	Водоплътна блокираща порите (pore blocking) добавка (Cementaid Everdure Caltite или подобна) при разход 30 l/m ³ (при доказана необходимост) Антимикробна добавка (или подобна)

Таблица 3.12. Определени изисквания за минимално бетонно покритие, първична и допълнителна защиты

Елемент	Метод	Изложена на въздействие повърхност	Мин. бетонно покритие [mm]	Δt [mm]	Общо бетонно покритие [mm]	Микс	Среден коефициент на дифузия на 56-ти ден, съгл. NT Build 443[x10 ¹² m ² /s]	Допълнителна защита
Тунелни крепежни тръби	Предварително изготвени	вътрешна	30	5	35	1 или 2	1	А. Слой от фибростъкло
		външна	45	5	50			Б. Защитно бетонно покритие В. Защитно мазано покритие





Фиг. 3.14. Работни чертежи на тунелните крепежни тръби [16]

6. **Подход за проектиране и моделиране на устойчивостта на бетоните**

Поради съображенията разгледани в Раздел I и в съответствие с предложената от автора методика за осигуряване на експлоатационния срок на подземни стоманобетонни съоръжения. (Раздел III, т. 2) се извършва проверка и препотвърждаване на избраните рецептури (Раздел III, т. 12), чрез вероятностно моделиране на жизнения цикъл на съоръженията. За целта са използвани Fib Bulletin 34 Model Code for Service Life Design, 2006 [108] и Life 365 Service Life Prediction Model - ASTM C1556 [23], методика GHD.

7. **Рискове за корозионно въздействие и механизми за увреждане на крепежните тунелни тръби**

Очакваните механизми за влошаване на състоянието на тръбите са свързани с излагането и въздействието на външна много агресивна подземна среда и вътрешна канализационна агресивна експлоатационна среда от отпадни индустриални води.

Идентифицираните рискове са представени по-долу, както следва:

- Влияние на хлориди, вследствие на високото съдържание на хлориди в почвите и в подземните води;
- Карбонизация – представлява риск главно за елементите при атмосферна експозиция, съответно рискът от този вид корозия може да се приеме за пренебрежим за разглежданите тунелни крепежни елементи;

- Напукване на бетони – температурни пукнатини, дължащи се на процесите на хидратация, свързване и набиране на якост на бетона и влиянието на температурата на околната среда;
- Сулфидно водородно въздействие върху вътрешната страна на канализацията;
- Сулфатно въздействие, дължащо се на високото съдържание на сулфати в почвите и в подземните води;
- Абразивно действие на канализационните разтвори.

Съгласно поставените задачи е направен анализ и обосноваване на възможните механизми на увреда на стоманобетона за конкретните съоръжения, разгледани в дисертацията по установените рискове.

8. Моделиране на корозионната устойчивост спрямо проникване на хлоридни йони

8.1. Методики и софтуери използвани за създаване на модели за симулиране на въздействие от хлориди

Разгледани са принципните положения при методиките за създаване на модели за симулиране на въздействие от хлориди - американската *Life 365 / ASTM C1556*, европейската *Fib 34 / DuraCrete*, със софтуер *DuraCon* и австралийската *GHD*.

8.2. Механизми за корозия под въздействие на хлориди на разглежданите тунелни крепежни елементи

Обикновено при подземни стоманобетонни елементи разположени под нивото на подпочвените води корозионният риск е намален поради очакваното ниско наличие на кислород. При подобни условия армировката достига силно негативни потенциали и се приема, че корозира с незначителна скорост.

Макроклетъчният корозионен механизъм може да ускори корозията в ниско кислородна среда, като е наблюдавано значително намаляване на сечението на армировка в стоманобетонни съоръжения в региона [60]. В случая този риск е намален поради факта, че разглежданата тунелна конструкция има вътрешно облицовъчно покритие при условие, че същото не бъде компрометирано по време на срока на експлоатацията.

Една част от разглежданите тунелни облицовки е подложена на намокряне и изсъхване в подземни условия вследствие на сезонните колебания на нивото на подземните води.

Трудно може да се предвиди точният ефект върху конструктивната пригодност. Корозионните процеси вследствие на посочените механизми е най-вероятно да бъдат локализирани и особено интензивни по участъци на конструкцията, с компрометирано качество, като например зони с дефекти, като например намалено бетонно покритие или недобре уплътнен бетон, а не върху цялата повърхност. Същото важи макар и в по-малка степен за местата, където външните защити (мазана и циментно инжектиране) са

нарушени и следователно тези участъци ще бъдат изложени по-рано и по-дълго на хлоридно агресивно въздействие. По същият начин и частта от тунела, която ще работи в експлоатационни условия на редуване на потопяване и изсъхване ще бъде по-уязвима.

8.3. *Подход за моделиране*

Моделирането на проникването на хлориди е извършено, посредством създаването на вероятностни модели.

Тези модели се основават на числено решение на стандартна грешка във втория Закон на Фик (Fick) за дифузия (нестационарно състояние) и теориите за надеждност, които се прилагат в конструктивното проектиране за постигане на 95 % надеждност [16].

Възрастта се изчислява за инициране на корозия и настъпване на напукване. Тези възрасти не определят крайната граница на експлоатационна годност и проектен живот и съоръженията обикновено ще изпълняват адекватно функциите си за още известен период.

8.3.1. *Адаптация на методиките за моделиране на проникване на хлориди към тунелните конструкции*

Външната защита ще забави излагането на хлоридни соли. Опитът от изследване на подземни тръбопроводи показва, че процентът на увреждане за покрития, като епоксидни смоли, първоначално е нисък (обикновено до 3 %). С течение на времето степента на увреждането ще се увеличи до приблизително 6 % след 30 години. Ако приемем, че степента на развитие на нарушението следва квадратно-времева връзка, тогава компрометираната част след 60 години ще бъде приблизително 15 % и след около 80 години над 25 % [16]. По същия начин циментовата инжекционна смес, запълваща пространството между облицовката и масива допринася за дълготрайността чрез увеличаване на ефективното защитно покритие, което ограничава и наличието на кислород. Циментациите освен това имат предназначението до ограничат водопритока. Съответно за неизвестен времеви период може да се допусне значително намаление на потока и подвижността на подземните води около тунелните носещи конструкции. Скоростта на корозия на стоманената армировка във водонаситен стоманобетон в безкислородна среда не е добре установена. Корозията е за сметка намаляването на сечението на армировъчните пръти. Съответно, не може да бъде пренебрегната, което е в съзвучие с някои публикации представящи доказателства от фактически изследвания [60].

Вътрешната облицовка се очаква да намали риска от т. нар. макроклетъчна корозия, тъй като вътрешната повърхност на бетона и армировката няма да бъдат изложени на канализационната атмосфера. Публикувани данни за стоманобетон в зоната на конвекция и напълно потопен във вода показват нива на корозия, респективно, от порядъка на 12 μm на година до по-малко от 1,2 μm на година [111]. При разглежданите тунелни тръби коефициентът на корозия, в зоната на конвекция, се очаква да бъде в горната част на този диапазон, където циментацията е компрометирана. Следователно може да се очаква ниво на корозия от порядъка на 10 - 12 μm годишно в периода на разпространение. Извършеното моделиране има основната задача да предвиди

продължителността на периода от настъпването на корозия в стоманобетона до ниво на конструктивно нарушение, представляващо, край на експлоатационния живот.

8.4. Вероятностно моделиране на корозия, предизвикана от хлориди

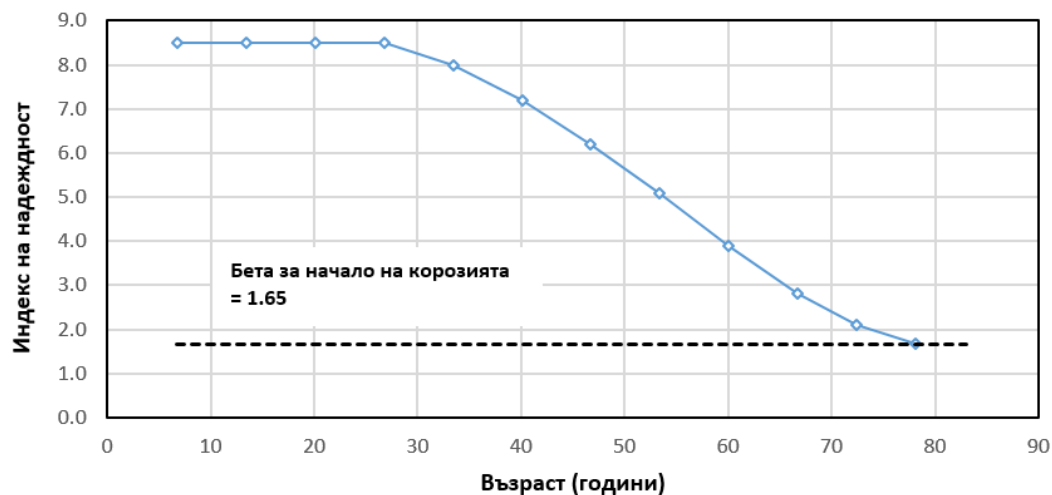
8.4.1. Моделиране съгласно методиката на GHD

Таблица 3.19.

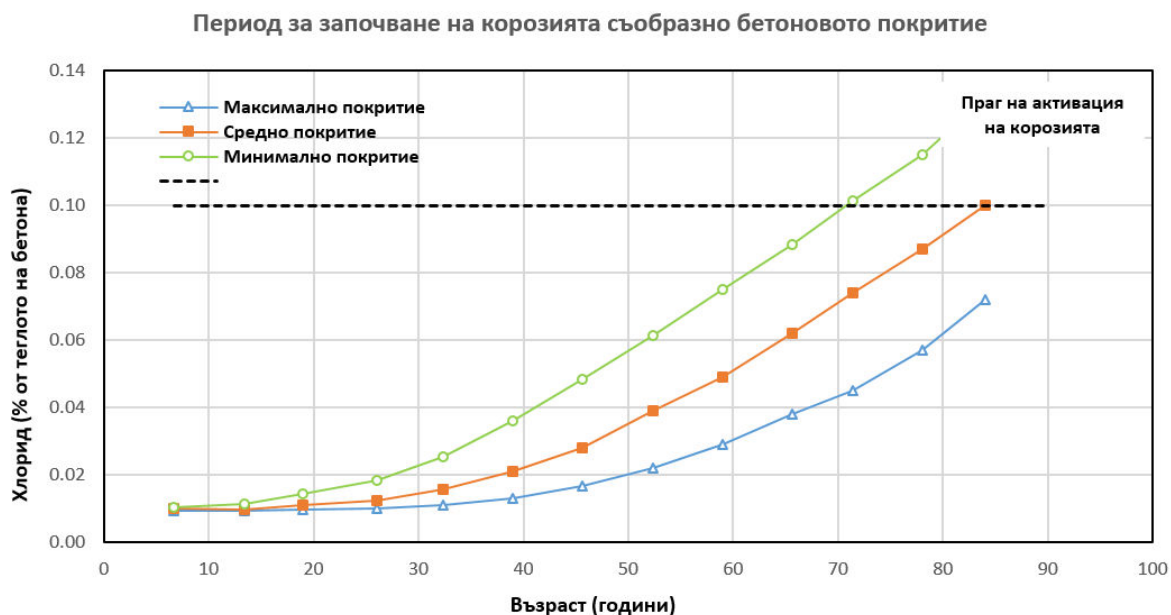
Входни данни	
Изходни данни	

Настройки за изчисление				
Класификация на експозицията				
Параметри		Стойност	Коефициент на вариация	Мерни единици
Коефициент на дифузия на хлориди	D_{ref}	$1,50E^{-12}$	10 %	m^2/s
Фонова концентрация на хлориди	C_o	0,01		% от теглото на бетона
Концентрация на хлориди на повърхността	C_s	0,80	10 %	% от теглото на бетона
Праг на активиране на корозията	C_{act}	0,1	10 %	% от теглото на бетона
Относителна възраст на бетона в години	Не се използва			години
Относителна възраст на бетона в дни		56		дни
	t_{ref}	0,15		години
Максимална прогнозирана възраст	t_{max}	80		години
Дълбочина на покритието	x_{cover}	50	5 %	мм
Диаметър на армировката	dia	24		мм
Степен на смесване на свързващото вещество (цимент и активни минерални добавки)	Blending	60		% тегло общо съдържание на свързващото вещество
Съдържание на свързващото вещество	Content	400		kg/m^3
Корозионен инхибитор	Inhibitor	0		lts/m^3
Фактор на възрастта на бетона	m	0,4		
Целева якост на натиск (еквивалентен цилиндър)	F_c	57,5		MPa
Корозия до пропукване	X_c	38	10 %	

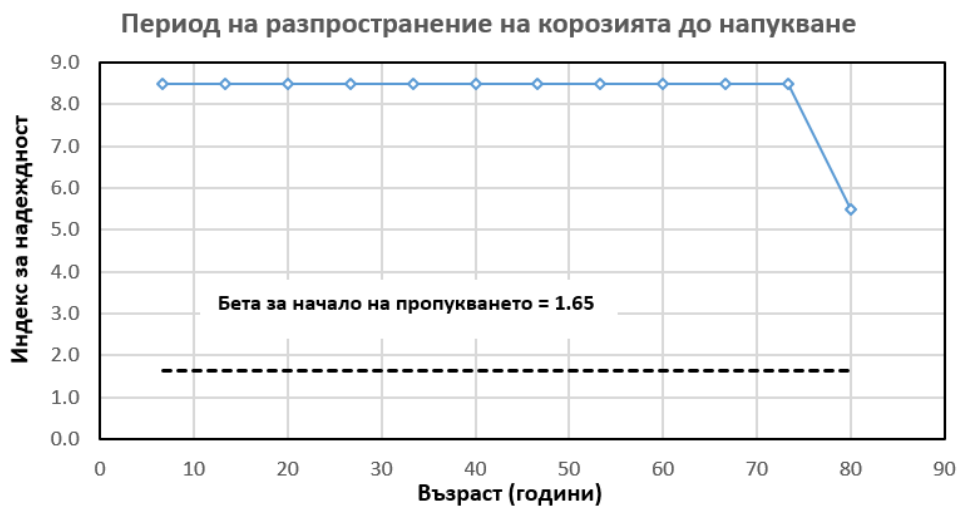
Диаграма за надеждност на период за започване на корозия



Фиг.3.28. Диаграма за надеждност на времето до започване на корозията



Фиг. 3.29. Период на започване изчислен съобразно бетоновото покритие



Фиг. 3.30. Период на разпространение на корозията до напукване на бетона

Резултатите от вероятностния модел на хлоридна корозия по методиката на GHD са представени в таблица 3.20.

Таблица 3.20. Обобщени резултати от вероятностния модел за прогнозиране на корозията

Елемент	Праг на хлориди %/тегл. цемент	Риск от корозия	Период на започване на корозия при RI (индекс на надеждност) 1,65 [години]	Период на започване на корозия при средно покритие [години]	Период на разпространение на корозията до напукване при RI 1,65 [години]	Изчислен експлоатационен срок [години]
Тунелни тръби	0,2	пренебрежим	65	70	75	75
	0,4	вероятен	72	78	>80	>80
	0,6	сигурен	78	84	>>80	>>80

Анализът показва, че целевият среден коефициент на миграция на хлориди от $1,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ отговаря на необходимата дълготрайност, като е в съответствие с изискваната стойност на QCS [38] за клас 3.

Очаква се стоманобетонът с постигнато проектно защитно бетонно покритие да има вероятен риск от започване на корозия след над 75 години, с ограничено разпространение на корозия до проектния живот от 80 години, което няма да повлияе значително на конструктивната пригодност и следователно отговаря на изискванията за дълготрайност.

8.4.2. Вероятностен модел по Life 365

За целите на работата е създаден модел за прогнозиране на дълготрайността посредством симулиране на въздействие на хлоридни йони върху тунелната конструкция с помощта на методиката и софтуера Life 365.

Заложени са 7 различни типови рецептури на бетона (виж табл. 3.21). Входящите данни са определени в съответствие с характеристиките на околната среда, вида на експозиция, конструктивните особености на тунелните елементи, съдържанието и типа цимент и активни минерални добавки, отношението В/Ц и целевите параметри за корозионна устойчивост на бетона, използвайки насоките предоставени в [23], [38]. Същите са представени в табл. 3.21.

Изпълнен е вероятностен анализ на експлоатационния живот на стоманобетонна тунелна облицовка, изложена на хлоридно въздействие, моделирана с помощта на софтуера Life 365 (версия [2.2.3.1.], 2022 год.). Основната цел е да се оцени влиянието на седем различни бетонни смеси върху дългосрочната устойчивост на конструкцията при определените условия на околната среда. Подбраните бетонни рецептури варират по отношение на водоциментното отношение (В/Ц) и процента на добавяне на активни минерални добавки, по-специално гранулирана доменна шлака (ГДШ) и микросилициев прах (МСП). Анализът отчита несигурността, свързана със свойствата на материалите, качеството на строителство и факторите на околната среда, за да се получат по-реалистични прогнози за експлоатационния живот.

Определяне на модела и конструктивните му параметри

Следващата таблица (табл. 3.21) обобщава входните параметри използвани за оценяване на дълготрайността за всяка от седемте подбрани представителни бетонни смеси.

Таблица. 3.21. Входящи параметри използвани за моделирането

Симулация No	Бетонова смес	ГДШ [%]	МСП [%]	В/Ц	Максимална повърхностна концентрация C_t [% тегло/бетон]	% на армиране	Хидратация [години]
1	W/C 0.29_1	50	5	0,29	0,8	1,2	30
2	W/C 0.29	65	5	0,29	0,8	1,2	30
3	W/C 0.30	65	5	0,30	0,8	1,2	30
4	W/C 0.31	45	8	0,31	0,8	1,2	30
5	W/C 0.32	60	5	0,32	0,8	1,2	30
6	W/C 0.33	65	5	0,33	0,8	1,2	30
7	W/C 0.32	-	5	0,32	0,8	1,2	30

Резултати и заключения

Анализът дава следните резултати:

Таблица 3.22. Резултати от моделирането

Симу- ляция No	Бетонова смес	D ₂₈ [m ² /s]	m	Критична концентрация C _t [% тегло/бетон]	Период на започване [години]	Период на разпростране- ние [години]	Оценен експлоата- ционен срок [години]	Стандартно отклонение	Забележка
1	W/C 0.29_1	2,003	0,57	0,05	83	6	89	1,2	Изискването е <u>удовлетворено</u>
2	W/C 0.29	1,000	0,49	0,05	>100	6	> 106	1,2	Изискването е <u>удовлетворено</u>
3	W/C 0.30	2,003	0,57	0,05	83,6	6	89,6	1,2	Изискването е <u>удовлетворено</u>
4	W/C 0.31	1,2904	0,46	0,05	70,8	6	76,8	1,2	Изискването <u>не е</u> <u>удовлетворено</u>
5	W/C 0.32	2,2372	0,54	0,05	66,5	6	72,5	1,2	Изискването <u>не е</u> <u>удовлетворено</u>
6	W/C 0.33	2,3643	0,57	0,05	72,6	6	78,6	1,2	Изискването <u>не е</u> <u>удовлетворено</u>
7	W/C 0.32	2,2372	0,20	0,05	17,8	6	23,8	1,2	Изискването <u>не е</u> <u>удовлетворено</u>

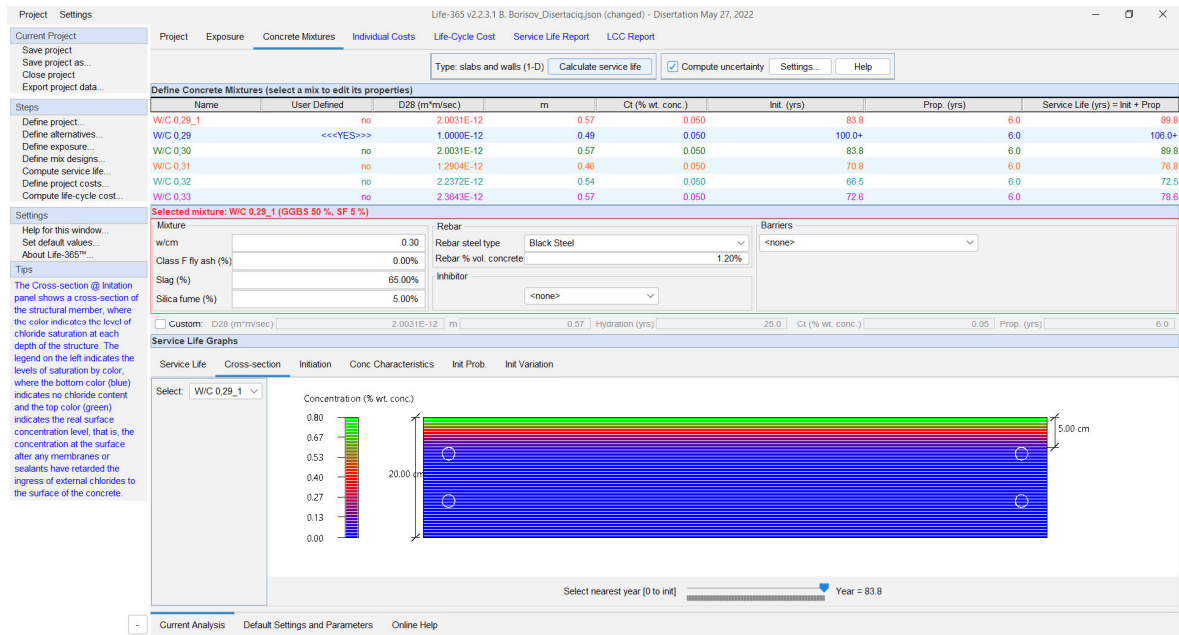
Вероятностната симулация на дълготрайността, използваща Life 365, предостави сведения за влиянието на бетонните смеси върху дългосрочното представяне на тунелната облицовка при хлоридно въздействие. Отчитането на несигурността в параметрите доведе до по-реалистични прогнози за експлоатационния живот. Резултатите показаха, че бетонните рецептури с водоциментно отношение под 0,31 и по-високи съдържания на активни минерални добавки удовлетворяват изискването за целеви експлоатационен срок. Моделът не отдава определящо значение на коефициента на дифузия на 28^{ми} ден поради очакваната продължителна хидратация и увеличение на непроницаемостта и корозионната устойчивост на бетоните с добавени активни минерални добавки във времето. Това обяснява на пръв поглед противоречивият резултат за получен по-дълъг експлоатационен срок при случаи на симулация с по-висок D28 в сравнение на такива показващи по-ниска степен на дифузионна способност на бетона – например Симулация No 4 и Симулация No 3. Този принцип заложен в Life 365 е дискуссионен и показва разликата в подхода на американските инженери отдаващи водещо значение на водоциментното отношение и степента на заместване с активни минерални добавки (типа на цимента) без да се отдава толкова голямо значение на минималното съдържание на цимент (и активни минерални добавки) в m3 бетон и резултатите от ускорените тестове (на 28ми и 56ти ден) за дифузия на хлорни йони.

По същият начин Симулация No 7 разглеждаща бетонов състав с В/Ц 0,32 и двукомпонентен цимент (95 % ОПЦ и 5 % МСП) е оценена на притежаваща корозионна устойчивост еквивалентна на проектен живот от само 23,8 години, вследствие липсата на ЛП или ГДШ със заложен коефициент на възрастта на бетона m = 0,20. При все това коефициента на дифузия е оценен от софтуера на 2,2372 m²/s, което е не лош показател. Всъщност при пробните замеси подобна бетонна рецептура показва отлични средни резултати при изпитването от 0,76 m²/s на 28мия ден и 0,86 m²/s на 56тия ден (виж. Раздел III, т.12). Това показва, че въпреки, че базата данни на Life 365 е съставена въз основа на резултатите от дългогодишни многобройни изследвания все пак не

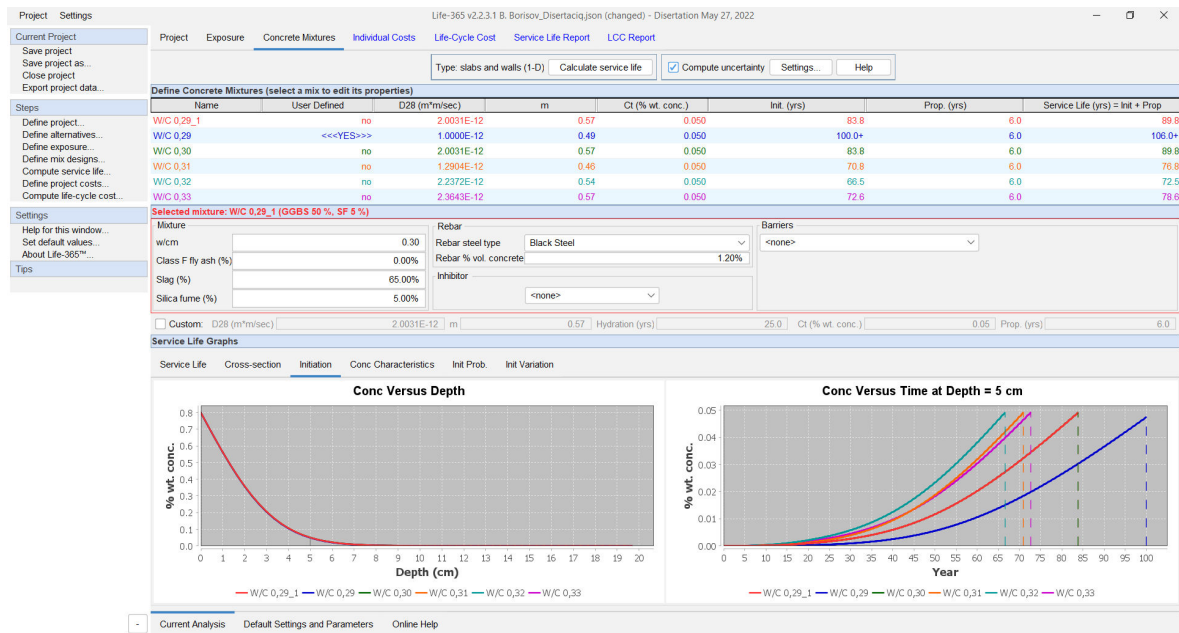
притежава абсолютна точност и не може автоматично да се приеме, като напълно достоверна, за други региони по света.

По отношение на Симулация No 7 - В/Ц 0,32; 95 % ОПЦ и 5 % МСП освен резултатите от моделирането за въздействие от хлоридни йони посредством Life 365 и показаните отлични резултати при обследването на проникване на хлориди, според автора, следва да се отбележи, че и устойчивостта на агресивно въздействие на сулфати е под въпрос поради неизползването на сулфатостойчив цимент или ГДШ или ЛП.

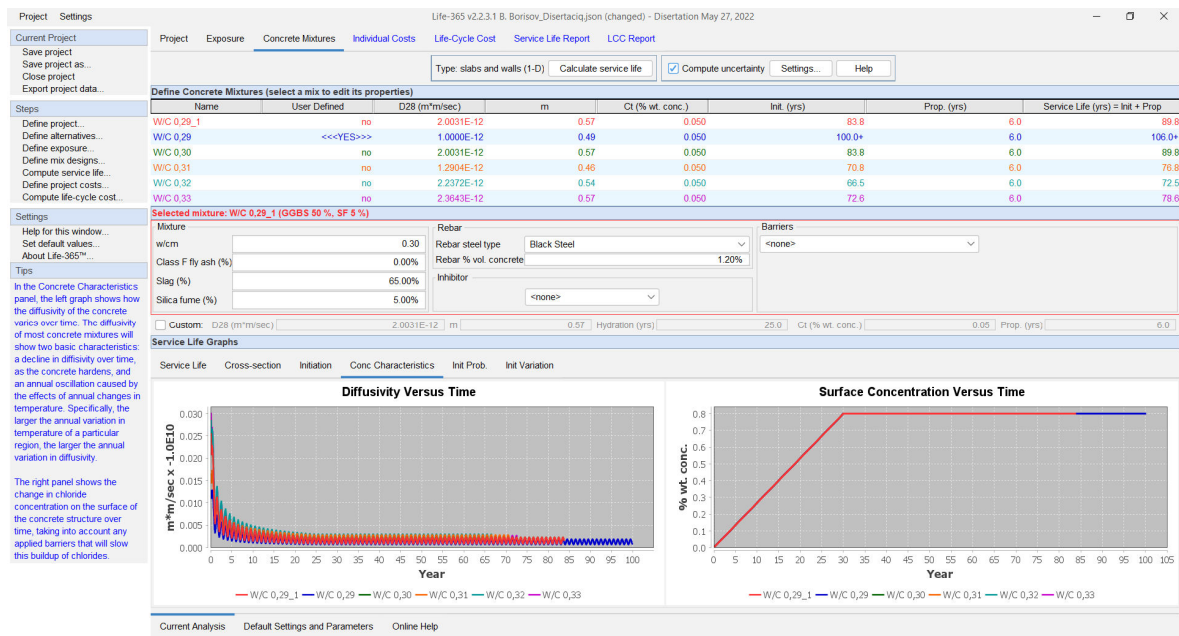
По-нататък е показано моделиране чрез Life 365.



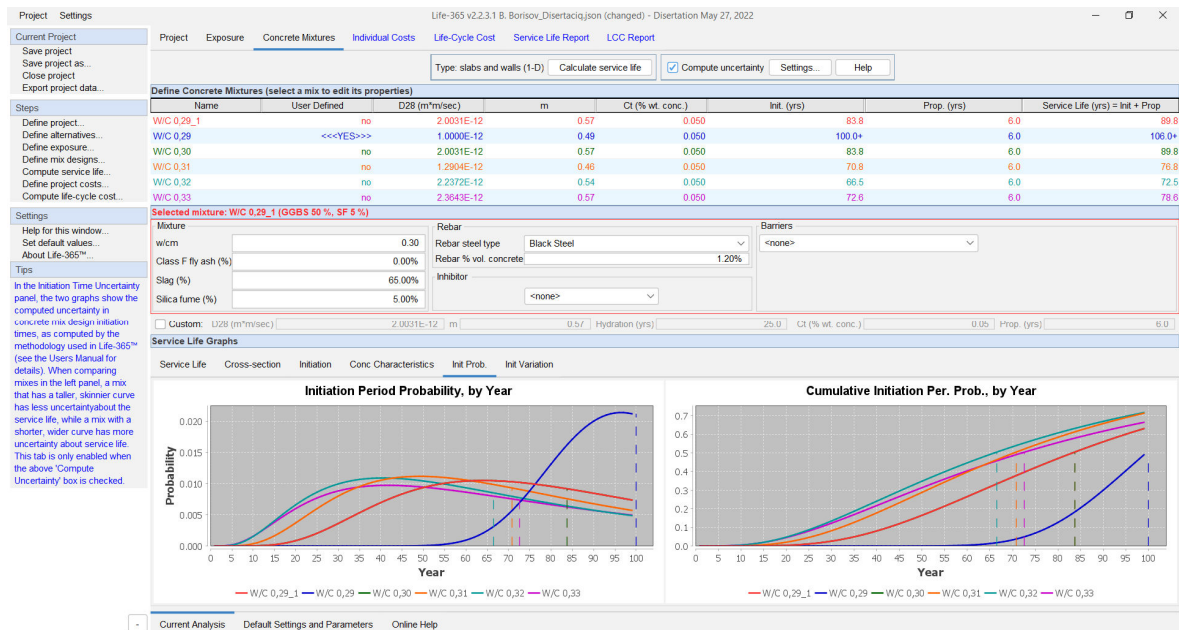
Фиг. 3.34. Резултати от изпълненото моделиране с визуализация на напречен разрез с развитието на концентрацията на хлориди в дълбочина във времето – Симулация No 1.



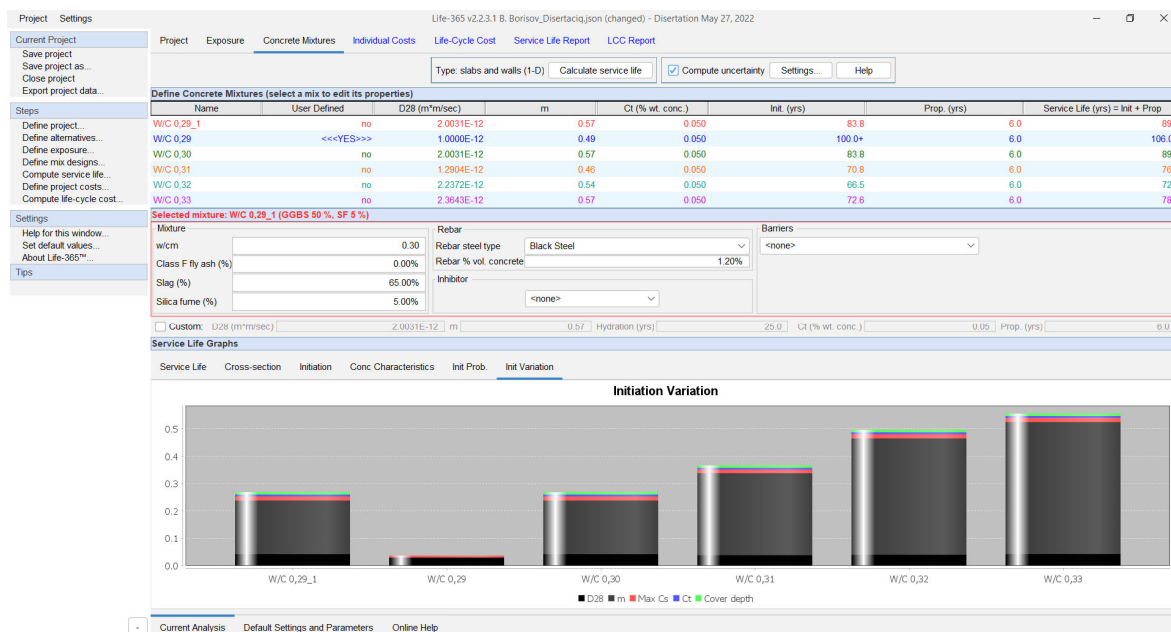
Фиг. 3.40. Резултати от изпълненото моделиране с графична визуализация на развитието концентрацията на хлориди в дълбочина и във времето (за определена дълбочина) за извършени шест (от седем) частни случаи на симулация.



Фиг. 3.41. Резултати от изпълненото моделиране с графична визуализация на развитието коефициента на дифузия и на повърхностната концентрация на хлориди във времето за извършените шест (от седем) частни случаи на симулация.



Фиг. 3.42. Резултати от изпълненото моделиране с графична визуализация на развитието на вероятността на периода за започване за извършените шест (от седем) частни случаи на симулация.



Фиг. 3.43. Резултати от изпълненото моделиране с визуализация на несигурността съгласно използваните коефициенти на вариация за съответните параметри на модела.

8.4.3. Вероятностен модел по fib 34

DuraCon е софтуер, разработен за изчисляване на вероятността от корозия, основаващ се на принципите, насоките и експерименталната информация, определени в рамките на проекта DuraCrete, респективно стандарта fib 34 (виж р. III, подточка 10.1.2.). За целите на дисертацията е създаден модел за прогнозиране на дълготрайността на посредством симулиране на въздействие на хлоридни йони върху тунелната конструкция с помощта на софтуера DuraCon.

Определяне на модела и параметрите му

Заложени са 4 различни степени за индекса за дълготрайност на бетона – коефициент на дифузия на хлоридни йони. Прието е нормално разпределение за входящите данни: бетонно покритие X_c (mm), коефициент на дифузия $D_{\text{coef}}(e^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$, критично съдържание на хлориди C_{cr} (% тегло/цимент), концентрация на хлориди на бетонната повърхност C_s (% тегло/цимент) и ефект на възрастта на бетона върху коефициента на дифузия - n .

Таблица. 3.23. Входящи данни на създадения модел

Променливи	Тип разпределение	Приета стойност (Диапазон)	Стандартно отклонение
X_c (mm)	N (нормално)	50	5
$D_{\text{coef}}(e^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	N (нормално)	1; 1,5; 2; 3; (5,3 ÷ 0,59)	0,12
C_{cr} (% тегло/цимент)	N (нормално)	0,35 (0,48 ÷ 0,15)	0,04
C_s (% тегло/цимент)	N (нормално)	0,80 (0,40 ÷ 1,00)	0,10
n	N (нормално)	0,47 (0,60 ÷ 0,15)	0,05
t_0 (дни)	D (детерминистично)	28	-
T (°C)	N (нормално)	44 (23 ÷ 44)	-

Резултати и заключения

Резултатите показват, че за бетони с максимален коефициент на дифузия от $1,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ вероятността от повреда е доста ниска, респективно индекса на надеждност е висок.

```

I
# D U R A C O N m e v2.3 - (c) 2009

# Title of the problem
Disertation B. Borisov;

# Model parameters
0 ; # Initial seed (1-randomly generated, 0-user defined)
1 ; # Diffusion coefficient (0-Dchloride profiling, 1-Dmigration tests, 2-Profile given)
10 ; # Time series (n>0, integer)
0 ; # Profile data (5<n<12, 0-no profile, interger)
0 ; # Profile prediction time (0-no, 1-yes)

# Distribution data table
# Distribution types:
# 0 - normal
# 1 - lognormal
# 2 - beta
# 7 - deterministic
#
# xc Dcoef Ccr Cs n t to T te
# (mm)(1e-12m2/s)(%wt.conc.)(%wt.conc.) (-) (years) (days) (Celcius) (days)
#
#1_3_5_7_9_#2_4_6_8_0_#1_3_5_7_9_#2_4_6_8_0_#1_3_5_7_9_#2_4_6_8_0_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_
0 0 0 0 0 7 7 7 7 ;
50.00 1.000 0.35 0.800 0.47 00.00 28.0 44.0 30.0 ;
5.00 0.120 0.04 0.100 0.05 80.00 00.0 00.0 00.0 ;

# Profile data table
# xc (cm) / Cxc (%wt.conc.)
#
#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_
00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 00.00 ;
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 ;

# N. Simulations
# n (integer)
#1_3_5_7_9_1
100000 ;

### Initial Seed
# i (integer)
#1_3_5_7_9_1
123897459 ;

### Profile prediction time (days)
# i (integer)
#1_3_5_7_9_1
0 ;

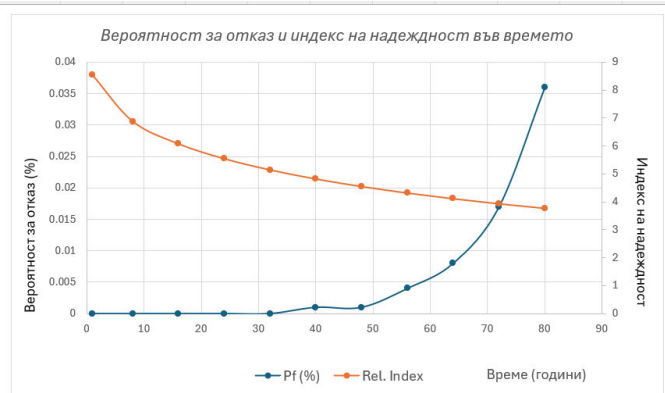
END_OF_FILE ;

```

Фиг. 3.57. Настройки на входящите параметри използвани за моделирането при индекс за дълготрайност на бетона – коефициент на дифузия на хлоридни йони $D_{coef} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Време (години)	Вероятност за отказ (%)	стандартно отклонение	Индекс на надеждност	Вероятност за отказ, поправена с Индекса на надеждност
80				
1	0	0	8.539796	0
8	0	0	6.883643	0
16	0	0	6.079962	0
24	0	0	5.548531	0.000001
32	0	0	5.1471	0.000013
40	0.001	0.00001	4.823869	0.00007
48	0.001	0.00001	4.553408	0.000264
56	0.004	0.00002	4.321144	0.000776
64	0.008	0.000028	4.117884	0.001912
72	0.017	0.000041	3.937426	0.004118
80	0.036	0.00006	3.775377	0.007988

D_{coef} 1
 C_{cr} 0.35
 n 0.47



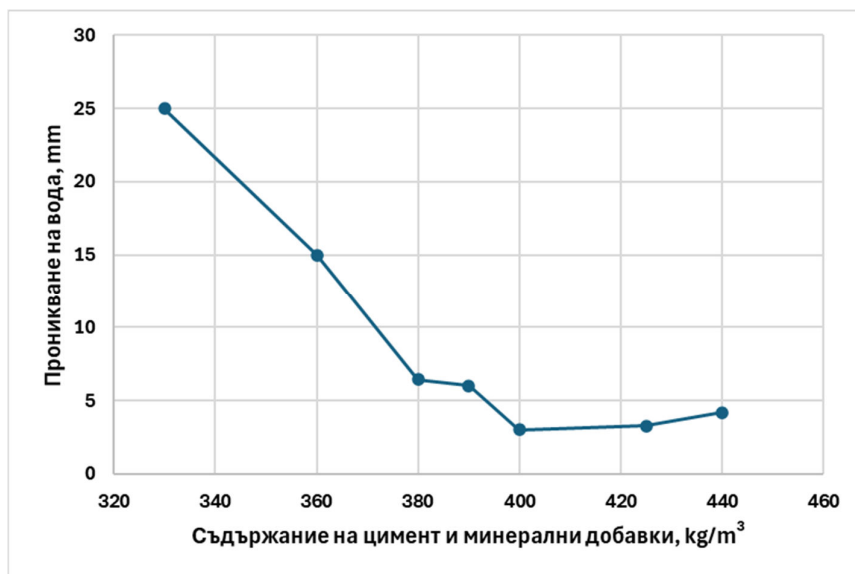
Фиг. 3.58. Резултати от моделирането при индекс за дълготрайност на бетона – коефициент на дифузия на хлоридни йони $D_{coef} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

При симулацията за експлоатационен период от 80 години при бетон с коефициент на дифузия $D_{coef} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ се получават резултати показващи, че Вероятността за отказ P_f на бетонната конструкция е 0,036 %, а Индексът на надеждност I_R е 3,78. Следователно условието за корозионна устойчивост, спрямо въздействието на хлориди, за изискуемият експлоатационен срок е удовлетворено.

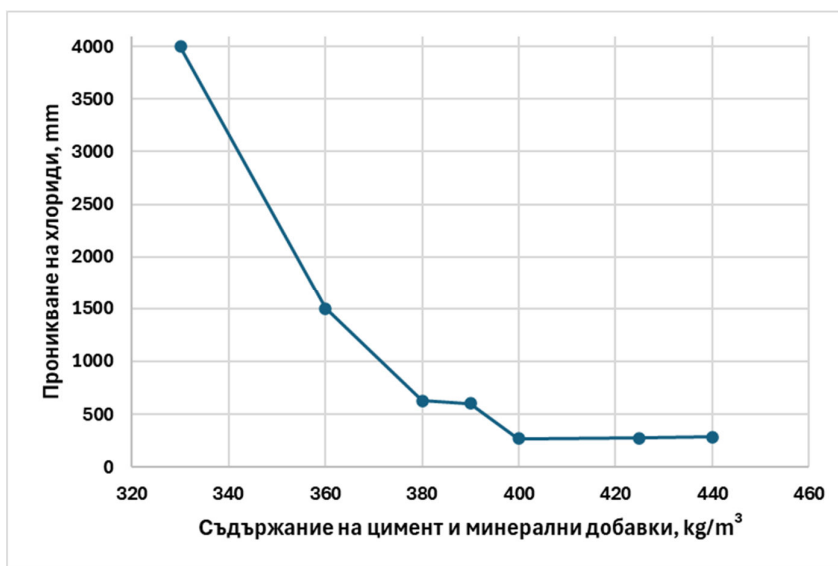
Таблица 3.25. Окончателни изисквания за бетоните за постоянните тунелни конструкции, прецизирани вследствие на извършеното моделиране

Характеристика	Стандарт	Изисквания на QCS	Тунелни тръби
QCS, клас по експозиция		Раздел 5 Част 6	4
Минимална якост на натиск	EN 206, BSEN 12390	Раздел 5 Част 6 S0811 Раздел 2.3 (g) (iii)	C60/75 C55/65
Цимент OPC 1 42.5	BS EN 197-1	Цимент Раздел 5 Част 3	30-55% 30 %
Гранулирана доменна шлака	BS EN 15167 ASTM C989	Добавки Раздел 5 Част 5	40-70 % ≥ 65 %
Силициев прах	ASTM C1240	Добавки Раздел 5 Част 5	5-8 %
Макс. агрегати		Цимент Раздел 5 Част 2	20 mm
Макс. в/ц фактор		Цимент Раздел 5 Част 3	0,35 0,30
Минимално съдържание на цимент			400 kg/m3
Максимално съдържание на цимент		Цимент Раздел 5 Част 6	500 kg/m3
Слягане mm		Цимент Раздел 5 Част 6	0-20 mm
Водоредуцираща добавка %		Цимент Раздел 5 Част 5	
Суперпластификатор % / теглото на цимента		Цимент Раздел 5 Част 5	
Хидрофобна добавка за блокиране на порите		Цимент Раздел 5 Част 5	При ————— доказана необходимост по време на пробните замеси и изпитвания
Макс. съдържание на хлориди, киселинноразтворими	BS 1881:124	Цимент Раздел 5 Част 6	≤ 0,10 %
Среден коефициент на дифузия (на 56-ти ден)	Nordtest NT Build 443*	Цимент Раздел 5 Част 6	1 x10⁻¹² m²/s 1,5 x10⁻¹² m²/s
Среден коефициент на дифузия (на 56-ти ден)	Nordtest NT Build 492*	Цимент Раздел 5 Част 6	1 x10⁻¹² m²/s 1,5 x10⁻¹² m²/s
Съпротивление на проникване на хлоридни йони (на 56-ти ден)	ASTM C1202	Цимент Раздел 5 Част 6	500
Абсорбция на вода (на 28-ми ден)	BS 1881 Part 122	Цимент Раздел 5 Част 6	≤ 1,2 %
Проникване на вода (на 28-ми ден)	BS EN 12390-8	Цимент Раздел 5 Част 6	≤ 5 mm
Устойчивост на сулфати	SVA (Немски стандарт)	НП	≤ 0,5 mm/min
Вътрешно бетонно покритие		Цимент Раздел 5 Част 11	50 mm
Външно бетонно покритие		Цимент Раздел 5 Част 11	50 mm
Адхезия на покритието	ASTM D4544	Цимент Раздел 5 Част 14	>2,5 MPa
Фиксатори		Цимент Раздел 5 Част 11	Пултрузирани и армирани с фибри
Повърхност и гладкост		Цимент Раздел 5 Част 9	Клас F 3

За целите на дисертационния труд коефициентът на Spearman и Kendall бяха използвани за анализ на връзката между показателите, отчитащи компонентите на бетоновата смес и резултатите (показателите), получени при изпитвани на бетонови образци. Коефициентът на корелация и регресионните уравнения са важни черти на стохастичната зависимост, но са недостатъчни за цялостното им характеризиране. Тъй като зависимостите и параметрите, обуславящи якостните и корозионноустойчивите характеристики на стоманобетона, в подземни условия, са сложни и многообразни, върху тях оказват влияние едновременно многобройни фактори. Това налага при изследването им да се използват многофакторни регресионни модели.



Фиг. 3.76. Влияние на съдържанието на цимент и минерални добавки върху свойствата на бетона обуславящи експлоатационната му дълготрайност – проникването на вода



Фиг. 3.78. Влияние на съдържанието на цимент и минерални добавки върху свойствата на бетона обуславящи експлоатационната му дълготрайност – проникване на хлориди

С цел получаването на по-обща зависимости, които да отчитат влиянието на два показателя от спецификацията на бетоновата смес върху *Якостта на натиск на 28-ми*

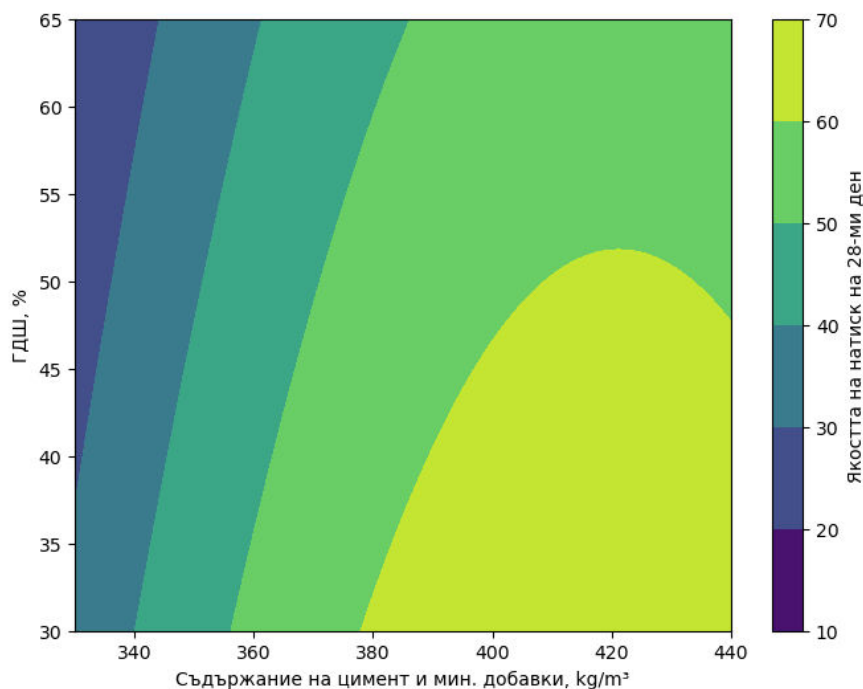
ден, както и показателите, отчитащи корозионната му устойчивост на 28-ми ден, бяха построени регресионни модели посредством полиноми от 2-ри ред.

Таблица 3.27. Изведени регресионни модели, служещи за приблизително определяне на експлоатационните свойства на бетоновите замеси

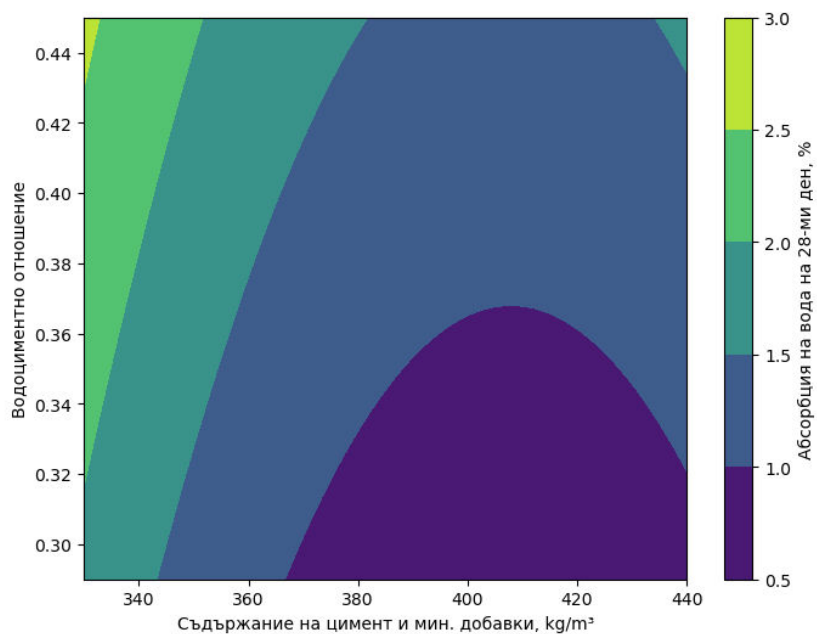
Показател	Binder	WCR	GGBS	Binder ²	WCR ²	Binder . WCR	Свободен член	R ²
CS _{28d}	3,58	-	0,365	0,00425	-	-	-675	0,4190
WP _{28d}	-2,296	26,9	-	0,00278	-	-	468	0,9701
WA _{28d}	-0,1648	4,41	-	0,000202	-	-	32.99	0,8964
RCP _{28d}	-316	4855	-	0,399	35259	-48	66782	0,9764

Където: CS_{28d} – якост на натиск на 28-ми ден (MPa); WP_{28d} – проникване на вода на 28-ми ден (mm); WA_{28d} – абсорбция на вода на 28-ми ден (%); RCP_{28d} – проникване на хлориди (Coul.); WCR – водоциментно отношение; GGBS – ГДШ (%); Binder – Съдържание на цимент и минерални добавки (kg/m³)

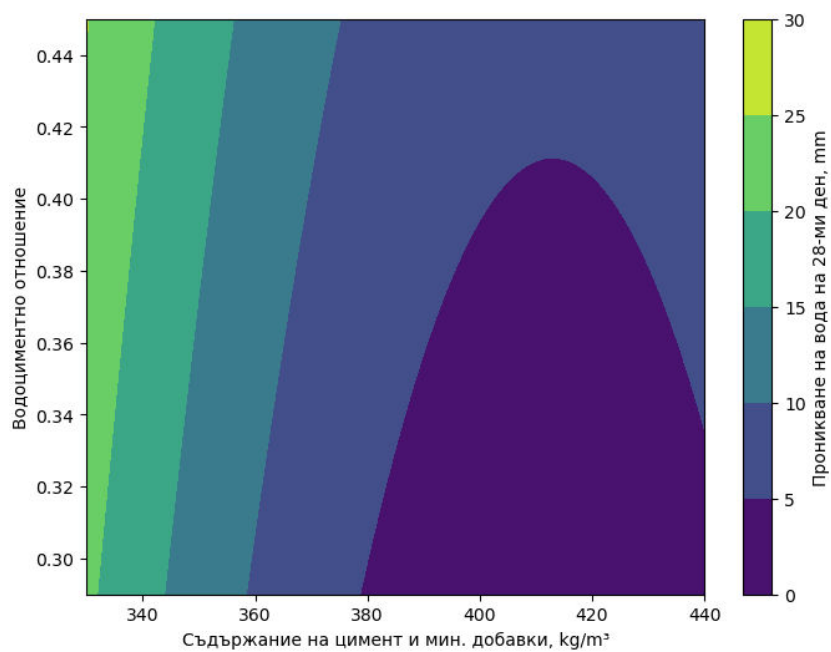
Графичен вид на изведените зависимости е представен на Фиг. 3.79-3.82.



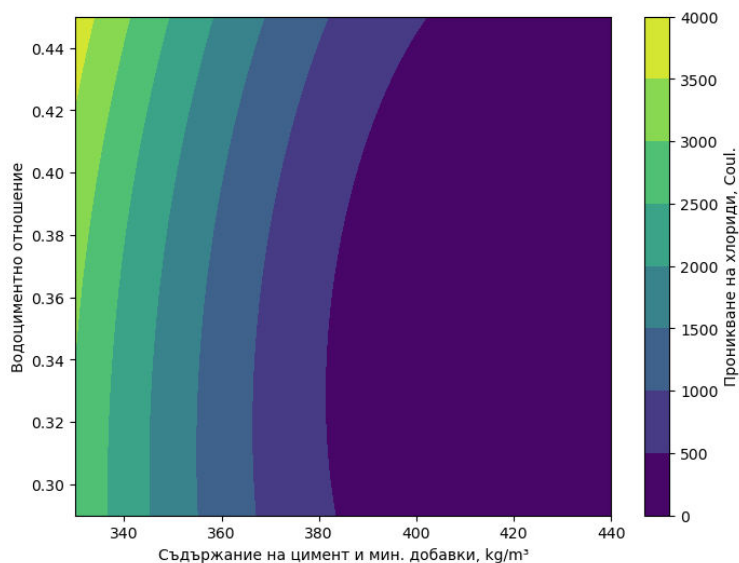
Фиг. 3.79. Изведена зависимост за приблизително определяне на Якостта на натиск на 28-ми ден



Фиг. 3.80. Изведена зависимост за приблизително определяне на Абсорбцията на вода на 28-ми ден



Фиг. 3.81. Изведена зависимост за приблизително определяне на Проникването на вода на 28-ми ден



Фиг. 3.82. Изведена зависимост за приблизително определяне на Проникването на хлориди на 28-ми ден

До известна степен апроксимация, базираща се на полином от втори ред също би могла да притежава известно отклонение от действителната зависимост между показателите. Независимо от това се потвърди хипотезата за същественото значение за приблизителното определяне на експлоатационните свойства на бетона има *Съдържанието на цимент и минерални добавки*, за което свидетелства използването на втора степен за самия показател в изведените регресионни модели.

За решаването на регресионната задача се оказва подходящо приложението на друг непараметричен модел, а именно – Дърво на решенията (Decision tree) от тип CART (Classification and regression tree - CART). За настоящите наблюдения са използвани данни от многократни изпитания при изпълнение на строителни проекти с участието на автора. Получените опитни резултати бяха обработени с цел да се изследва потенциала за използването им за прогнозирането на основните експлоатационни свойства на бетона, като по този начин те биха послужили за повишаването на надеждността на работа.

Поради тази причина за оценяване на неговата генерализираща способност е необходимо данните да бъдат разделени на обучаваща (тренираща) извадка и тестова извадка. За целта на дисертационния труд бе възприето обучаващата извадка да съдържа 70 % от първоначалните данни, а тестовата извадка – 30 % от тях. По този начин се цели да се установи кои модели са не само валидни, но и имат сравнително устойчиво ниво на точност на прогнозите при работа с неизвестни за модела данни. Като допълнителни критерии за изчисляване на размера на грешката на прогнозираните резултати, бяха възприети показателите: средноквадратична грешка (RMSE), средна абсолютна грешка (MAE) и средна относителна грешка (MAPE).

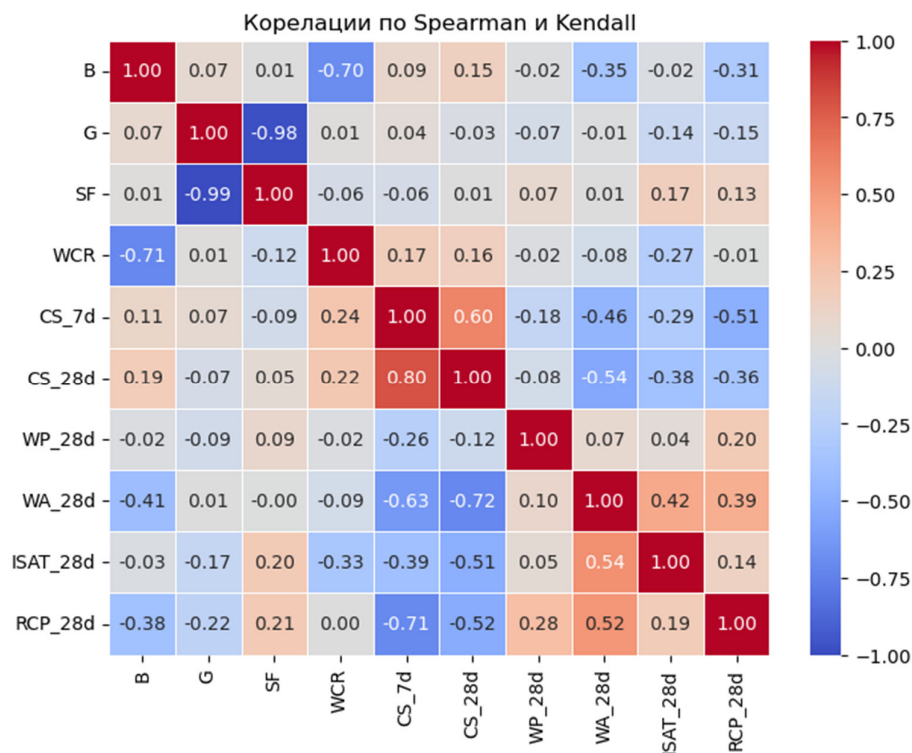
В Таблица 3.28. са представени основните статистики на разсейването на показателите на изпитаните партии, както и техните максимални и минимални стойности, които се считат за диапазона, в който прогнозният модел би функционирал адекватно.

Таблица 3.28. Вариационен анализ на наблюденията (231 бр.), получени при изпитания на партии от различни класове бетонови замеси.

Таблица 3.28. Вариационен анализ на наблюденията

Променлива	Мярка	Средно	Ст. отклонение	Min	Max
Количество цимент и минерални добавки	kg/m ³	386,23	18,35	380	440
ГДШ	%	33,13	30,12	0	66
МСП	%	4,87	3,56	0	8,16
Водоциментно отношение		0,37	0,02	0,33	0,4
Якост на натиск (7-ми ден)	MPa	45,32	7,32	28,4	61,4
Якост на натиск (28d)	MPa	59,11	8,76	39,6	78,2
Проникване на вода (28d)	mm	7,91	3,55	0	23
Абсорбция на вода (28d)	%	1,59	0,33	0,8	2,6
Изпитване за повърхностна абсорбция на вода	ml/m ² /s	0,03	0,01	0,01	0,09
Проникване на хлориди (28d)	Coul.	754,091	351,002	250	1931

За разлика от получените ориентировъчни резултати, при търсенето на директна аналитична зависимост между рецептурните и експлоатационните показатели не бе установена такава, която да послужи за практически цели. За това свидетелстват и ниските стойности на коефициентите на корелация, представени на Фиг. 3.83. За изобразената корелационна матрица важи, че коефициентите на Spearman са изобразени в долната лява половина на матрицата, а на Kendall – в горната дясна половина.



Фиг. 3.83. Корелационна матрица между рецептурните показатели, резултати, получени при предварителни изпитания и експлоатационните показатели на 28-ми ден

Това наложи възприемането на допълнителна променлива, базираща се на наблюденията от проведените междинни изпитания за якост на натиск на 7-мия ден, с които да се подобри точността на прогнозните модели. По този начин успешно бяха изведени по два регресионни модела за прогнозиране на показателите Якост на натиск на 28-ми ден, Абсорбция на вода на 28-ми ден и Проникване на хлориди на 28-ми ден.

В Таблица 3.29 са представени получените модели чрез софтуерния продукт Minitab и използваните показатели за тяхното създаване.

Таблица 3.29. Регресионни модели, получени само на базата на показатели от спецификацията на бетоновата смес и резултати от предварителни изпитания

Модел	Вид	Прогнозиран показател	Използвани показатели
1.1	Дърво на решенията (CART)	CS_{28d}	$CS_{7d}, GGBS$
1.2		CS_{28d}	$CS_{7d}, GGBS, WCR$
2.1		WA_{28d}	$CS_{7d}, GGBS$
2.2		WA_{28d}	$CS_{7d}, GGBS, WCR, Binder$
3.1		RCP_{28d}	$CS_{7d}, GGBS$
3.2		RCP_{28d}	$CS_{7d}, GGBS, Binder$

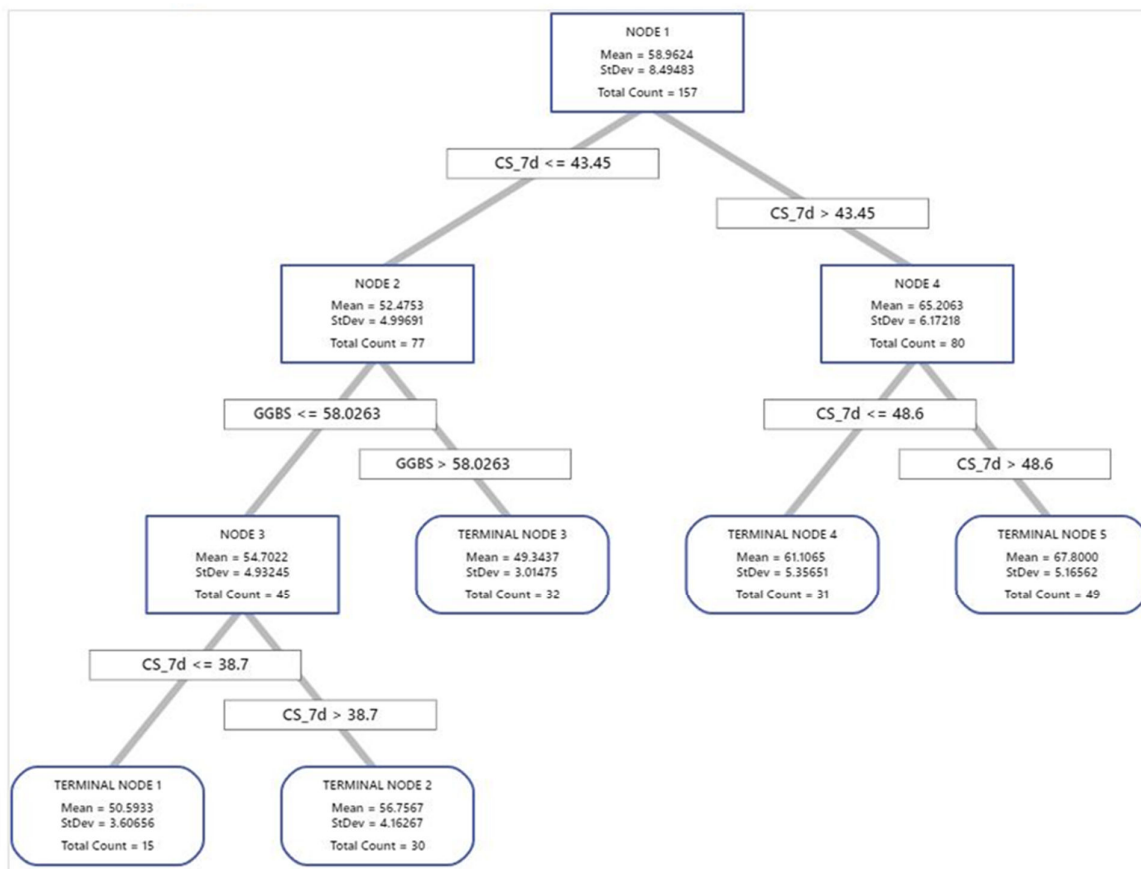
Точността и генерализиращата способност на изведените модели е представена на Таблица 3.30.

Таблица 3.30. Точност и генерализиращата способност на изведените модели

Модел	Прогнозиран показател	Обучаваща извадка (157 бр.)				Тестова извадка (74 бр.)			
		R^2	RMSE	MAE	MAPE	R^2	RMSE	MAE	MAPE
1.1	CS_{28d}	0,7173	4,52	3,12	5,42%	0,7418	4,70	3,57	6,25%
1.2	CS_{28d}	0,7295	4,42	2,99	5,17%	0,7523	4,60	3,50	6,13%
2.1	WA_{28d}	0,7187	0,17	0,14	8,81%	0,7066	0,19	0,15	10,02%
2.2	WA_{28d}	0,7152	0,18	0,14	8,89%	0,6765	0,19	0,15	9,72%
3.1	RCP_{28d}	0,6738	184,76	144,94	21,15%	0,7267	209,94	157,71	22,51%
3.2	RCP_{28d}	0,7093	174,42	130,74	18,22%	0,7519	199,08	146,54	20,24%

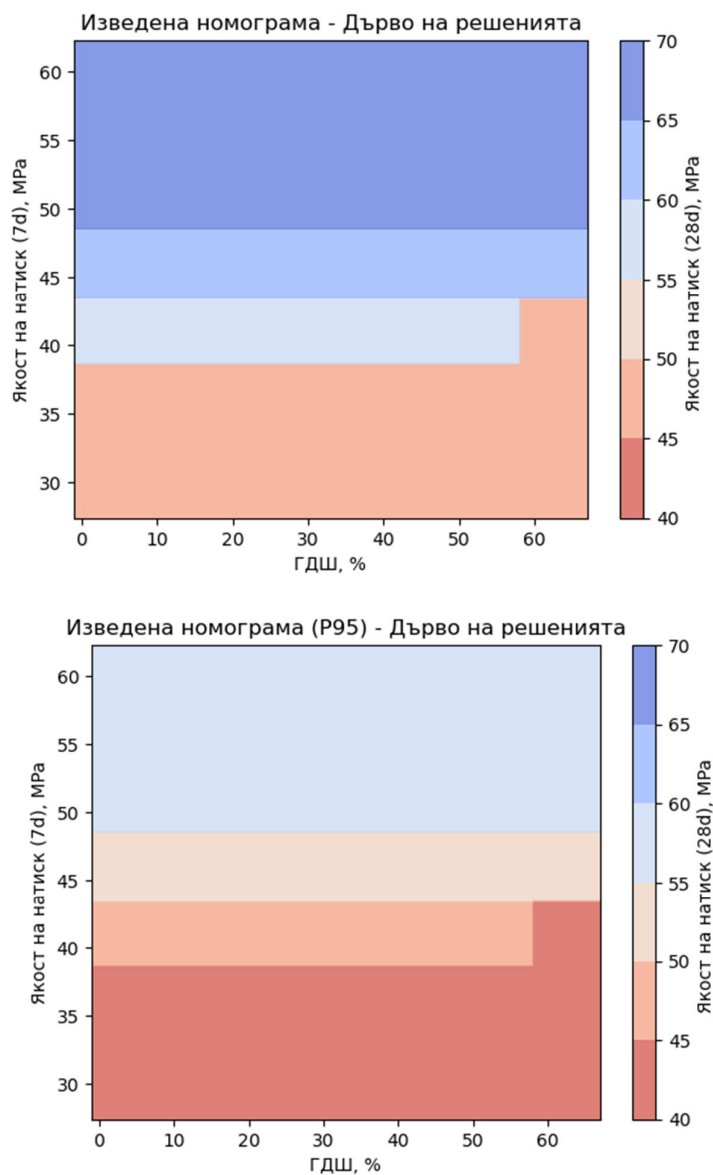
Където: R^2 - Коефициент на детерминация, MAE – Средна абсолютна грешка, RMSE – Средноквадратично отклонение, MAPE – Средна относителна грешка

На Фиг. 3.84. е представено Дървото на решенията за Модел 1.1, което позволява изведените правила да бъдат използвани за получаването на приблизителна оценка за Якостта на натиск за 28-ми ден на базата на показателите Съдържание на ГДШ (GGBS) и Якостта на натиск на 7-мия ден като предварителен резултати за якостта на 28-ми ден.



Фиг. 3.83. Дърво на решенията за прогнозиране на показателя на Якост на натиск на 28-ми ден (Модел 1.1)

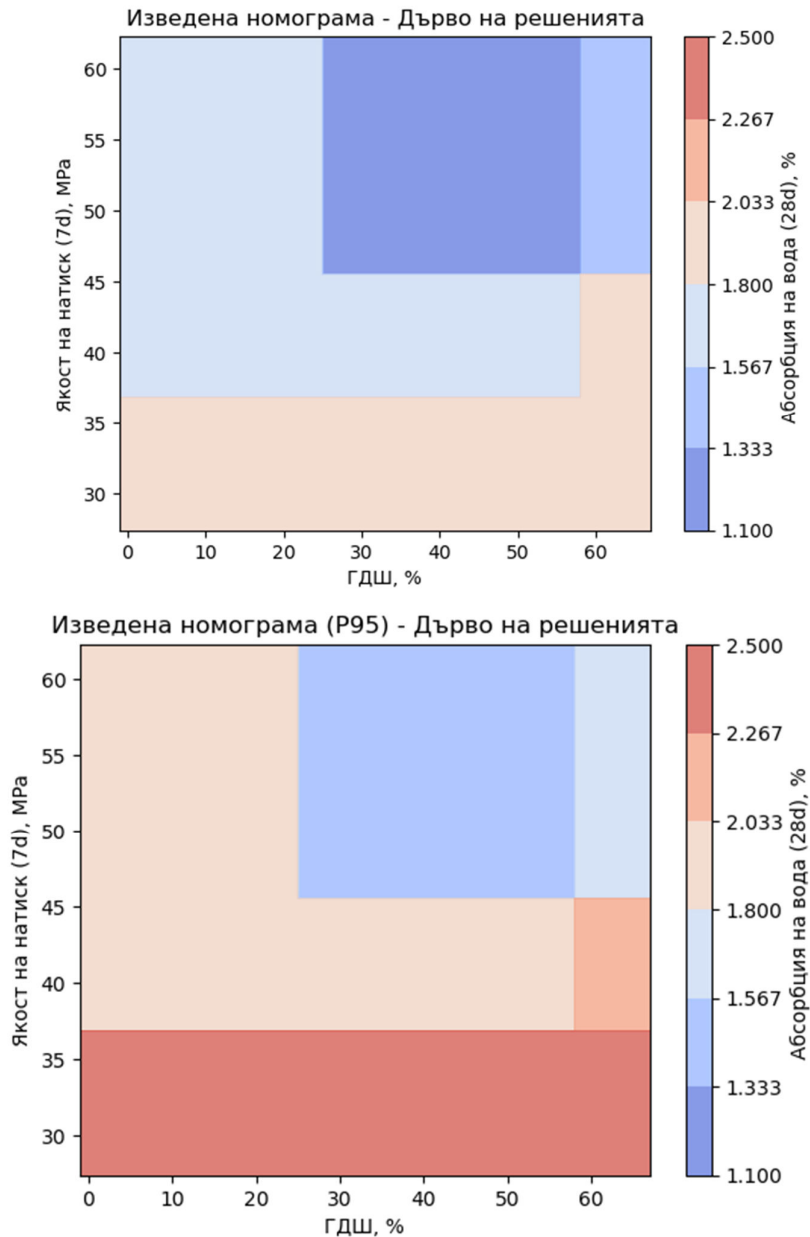
На Фиг. 3.84. е представена номограма, която следва логическата конструкция на дървото на решение за Модел 1.1. Посредством определеното стандартно отклонение за всеки възел i на дървото изчислена долната доверителна граница за всяка прогнозна стойност посредством $n_i - 1$ степени на свобода (където n_i е броят наблюдения във възела i) и t -разпределение на Student. Стойността, показана на графиката вдясно представлява 95-тия перцентил (P95) на прогнозната стойност, с цел възприемането на по-консервативен подход. Смисълът на доверителния интервал е, че в 95 % от случаите може да се счита, че действителната прогнозирана стойност на CS_{28d} ще бъде по-висока от възприетата.



Фиг. 3.84. Изведени номограми на използваните променливи за прогнозиране на показателя Якост на натиск на 28-ми ден (CS28d)

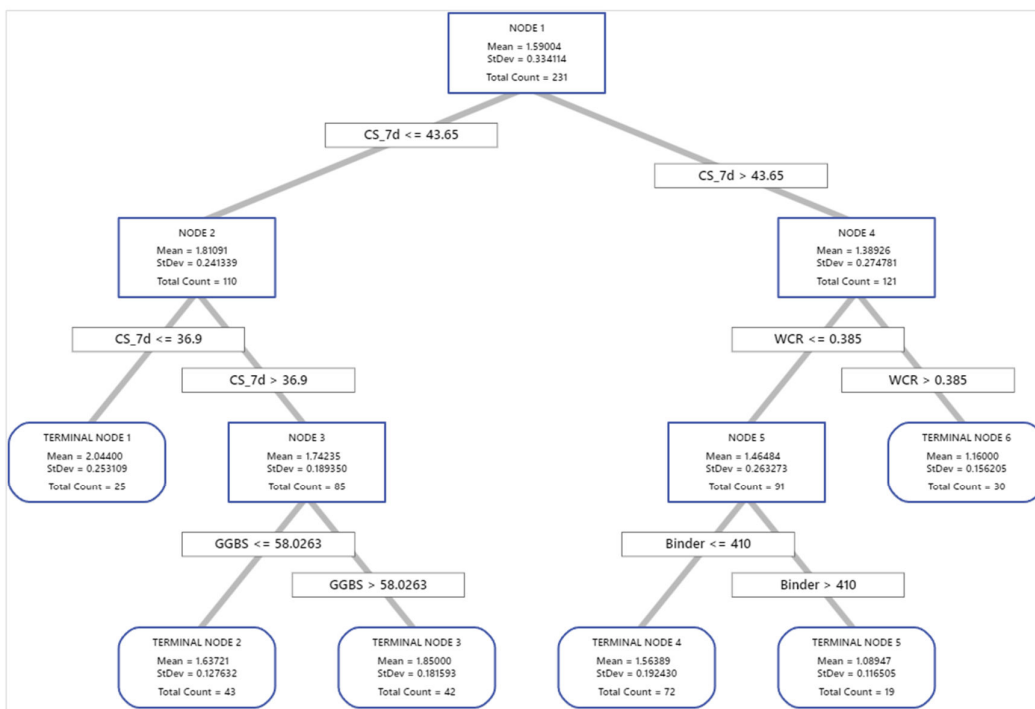
Алтернативен по-сложен модел (Модел 1.2) на получения с незначително по-висока точност е представен на Фиг. 3.85., при който участва и показателят *Водоциментно отношение (WCR)*.

Изведената номограма за показателя е представена на Фиг. 3.87. като отново е възприет по-консервативен подход чрез изобразяване на 95-ти перцентил в отделна номограма. Смисълът на доверителния интервал е, че в 95 % от случаите може да се счита, че действителната прогнозирана стойност на WA_{28d} ще бъде по-ниска от възприетата.



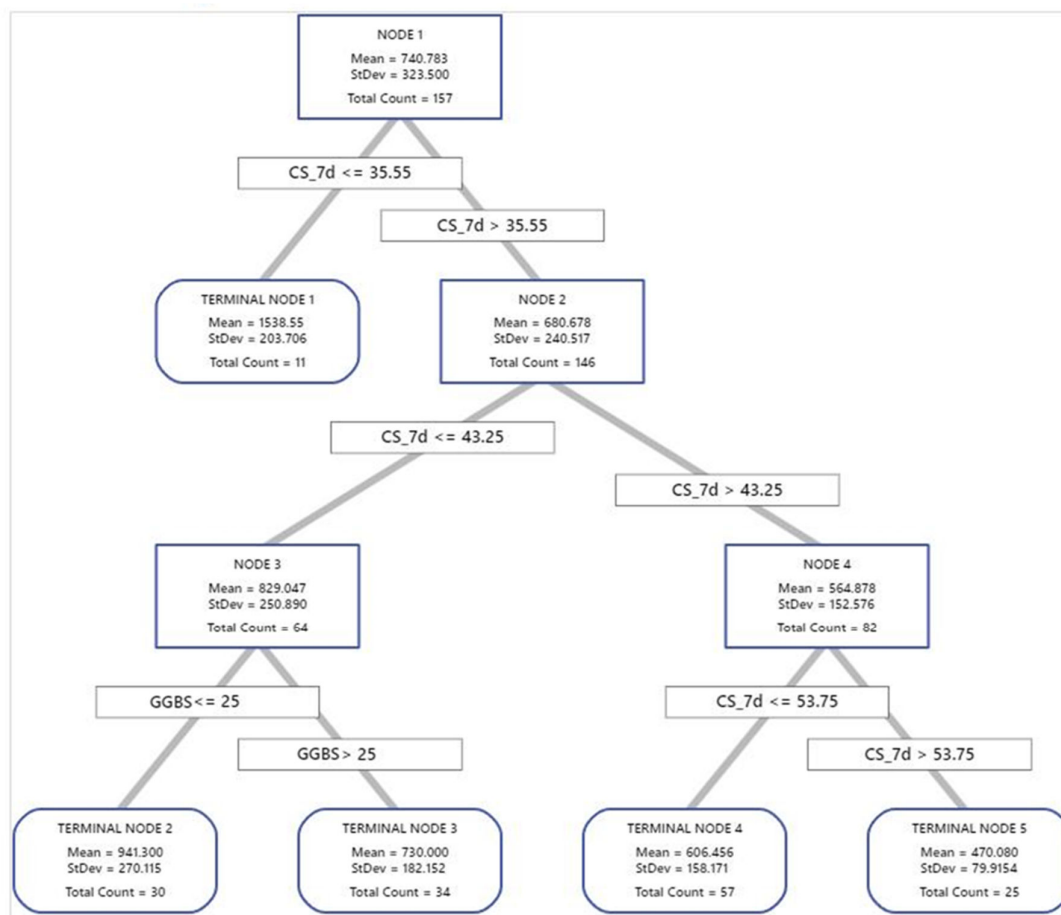
Фиг. 3.87. Изведени номограми на използваните променливи за прогнозиране на показателя Абсорбция на вода на 28-ми ден (WA_{28d})

Алтернативен модел на изведения, който отчита *Съдържанието на цимент и минерални добавки* е представен на Фиг. 3.88.



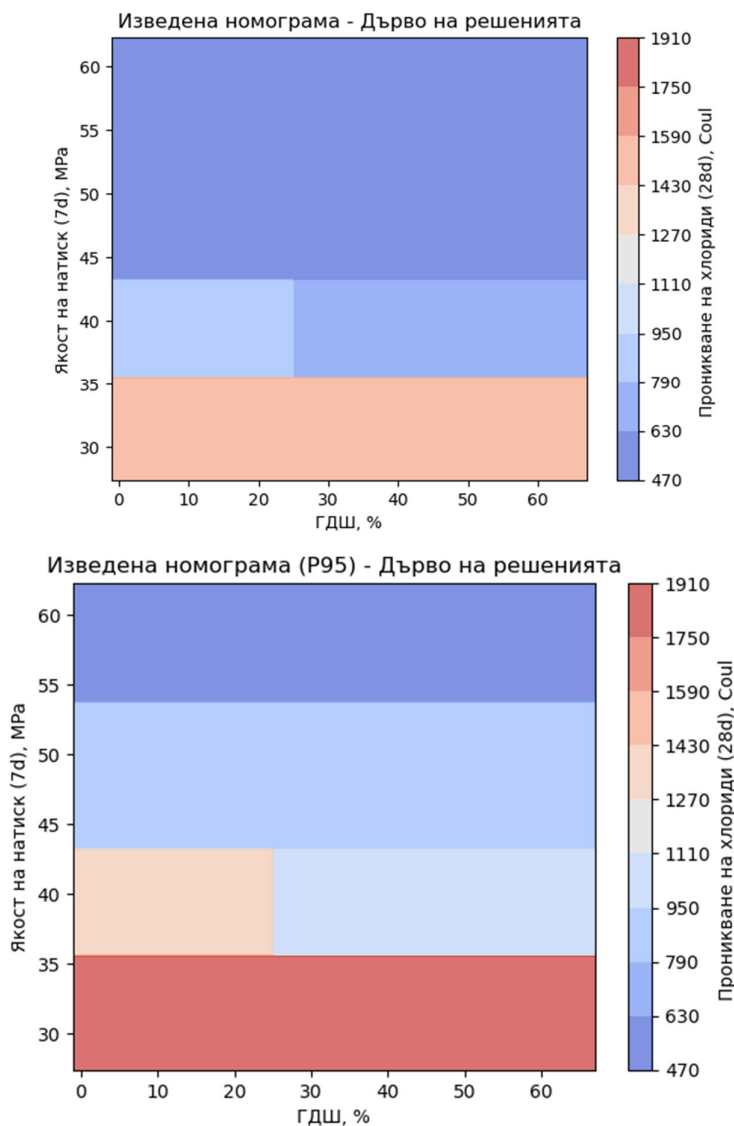
Фиг. 3.88. Дърво на решенията за прогнозиране на показателя на Абсорбция на вода на 28-ми ден (Модел. 2.2)

Аналогично бе подходено и за извеждане на дърветата при прогнозирането на показателя *Проникване на хлориди на 28-ми ден* (Фиг. 3.89.).



Фиг. 3.89. Дърво на решенията за прогнозиране на показателя на Проникване на хлориди на 28-ми ден (Модел 3.1)

Изведената номограма за показателя е представена на Фиг. 3.90. Отново е възприет по-консервативен подход чрез изобразяване на 95-ти перцентил в отделна номограма. Смисълът на доверителния интервал е, че с 95 % от случаите може да се счита, че действителната прогнозирана стойност на RCP_{28d} ще бъде по-ниска от възприетата.



Фиг. 3.90. Изведени номограми на използваните променливи за прогнозиране на показателя Проникване на хлориди на 28-ми ден (RCP_{28d})

Създаден бе и алтернативен на получения модел (Модел 3.1), който включва още и *Съдържанието на цимент и минерални добавки (Bidner)*.

Независимо от това, при продължаване на работата с вече изпробваните бетонови смеси, моделът се очаква да работи с установената в дисертационния труд точност. Именно поради тази причина е важно да се уточни, че изведените номограми важат единствено за изследваните условия и не следва да бъдат прилагани автоматично в други, макар и на пръв поглед аналогични условия. Въпреки това, възприетият подход за работа може да бъде приложен в други условия.

Предложен План за контрол на качеството (за инспекции и изпитвания)

Подробният План за инспекции и изпитвания (ПИИ) е ключов документ при изпълнението на отговорни строителни проекти. Основната му цел е да се гарантира, че изградените конструкции и съоръжения отговарят на изискванията за качество, съответстват на проектните спецификации и са спазени приложимите строителни стандарти и наредби. ПИИ се използва, като пътна карта за инспекциите, измерванията, лабораторните и полеви изпитвания през целия жизнен цикъл на проекта, от началните етапи на доставка, приемане и съхранение на материалите и суровините до окончателното завършване и предаване. В раздел III, точка 14. е предложен План за инспекции и изпитвания за конкретните тунелни елементи предмет на дисертацията.

11. Заключение и изводи

Настоящото дисертационно изследване предлага цялостен подход за осигуряване на дълготрайността на подземни стоманобетонни съоръжения в сложни условия на агресивни околна и експлоатационна среди. Разработена е комплексна методика, обхващаща всички етапи от проектирането през дейностите по строителството и периода на експлоатацията.

Идентифицирани са основните механизми на увреждане за конкретните разглеждани подземни съоръжения и са дефинирани класовете на експозиция на тунелните крепежни елементи. Изследването обхваща задълбочен преглед на съществуващата нормативна база, определянето на нормативните изисквания към бетоните и вероятностното моделиране на експлоатационния срок с помощта на три различни методики и софтуери. Проведени са симулации на проникване на хлориди, използвайки създадени от автора модели, съгласно методиките - Fib Bulletin 34 (DuraCrete), Life 365 и GHD, което позволи значително оптимизиране и прецизиране на изискванията към бетоните, определени съгласно съществуващите приложими стандарти и ръководства.

Подбрани са 24 бр. подходящи високоякостни и корозионноустойчиви рецептурни състава. Извършени са пробни замеси и е изпълнено надлежно обследване в лаборатории в Катар и Германия. Изследванията доведоха до идентифициране на оптимална рецептура, гарантираща заложения експлоатационен срок, като се вземат предвид техническите и икономическите аспекти.

Сравнителният анализ на резултатите от изпитванията на бетоните, както и използването на данни от други проекти и литературни източници, позволи установяване на взаимовръзки между състава на бетона и неговите характеристики, осигурявайки насоки за ускорено определяне на подходящи рецептурни състави, базирани на класовете на експозиция и целевите индекси на корозия. За целта са предложени регресионни модели, служещи за приблизително предварително определяне на експлоатационните свойства на бетоновите замеси. За решаването на регресионните задачи е разработен и приложен подходящ непараметричен модел. След приложение на предложените стохастични математически модели са изведени номограми.

Разработен е детайлен план за контрол на качеството, предназначен за управление на техническото съответствие по време на строителството и гарантиране на експлоатационната дълготрайност на съоръженията.

12. Научни и научноприложни приноси

1. Предложена е и е реализирана комплексна методика за осигуряване на експлоатационната дълготрайност на подземни стоманобетонни съоръжения в сложни инженерно-геоложки и експлоатационни условия със следните основни стъпки:
 - Определяне, анализ и обосноваване на възможните механизми на увреда на стоманобетона за конкретните съоръжения, разгледани в дисертацията. Изясняване и дефиниране на класовете по експозиция/въздействие на агресивни среди (съгласно приложимите нормативни стандарти, спецификации и ръководства) на тунелните крепежни елементи, предмет на работата;
 - Преглед на теоретичните постановки и оценка на факторите обуславящи различните механизми на корозия;
 - Обстоен преглед на изискванията на съществуващата приложима нормативна база за проектиране и строителство. Определяне на нормативните изисквания към бетоните, предпазващият армировката бетонов слой и необходимите мероприятия за допълнителна защита;
 - Моделиране на вероятностния експлоатационен срок като за входни данни са използвани спецификите на околната среда, конструктивните особености на съоръженията и техническите характеристики на бетоните.
2. Извършено е моделиране чрез симулиране на проникване на хлориди посредством следните методики и софтуери – разработената за нуждите на Европейския Съюз Fib Bulletin 34 - DuraCON (DuraCrete), северно-американската (САЩ и Канада) Life 365 и австралийската GHD;
3. Въз основа на резултатите от вероятностното моделиране, са извършени оптимизация и прецизиране на изискванията към бетоните, определени от стандартите и ръководствата;
4. Извършено е сравнение и анализ на резултатите от изследванията за различните смеси, резултатите от изследването на бетони на други проекти, за да се определят взаимовръзките между състава и характеристиките на бетоните. Изведени са регресионни модели, служещи за приблизително определяне на експлоатационните свойства на бетоновите замеси;
5. За решаването на регресионните задачи е приложен подходящ непараметричен модел, а именно – Дърво на решенията (Decision tree) от тип CART (Classification and regression tree - CART). Предложени са стохастични математически вероятностни модели и са изведени номограми. Направени са основни изводи, както и насоки за ускорено определяне на подходящи бетонови състави въз основа класовете по въздействие на околната среда;
6. Изготвен е подробен план по контрол на качеството (план за инспекции и изпитвания) с цел да се управлява техническото съответствие, по време на строителния процес, и да се обезпечи експлоатационният срок на съоръженията.

13. *Насоки за бъдещи изследвания*

Бъдещите изследвания биха могли да се фокусират върху:

- Разработване на по-прецизни прогнозни модели на корозионните процеси, включващи влиянието на сложни фактори, като неравномерно разпределение на хлоридите, флуктуациите на нивото на подпочвените води и други;
- Експериментално потвърждаване на дългосрочната корозионна устойчивост на определени бетонни рецептури в реални условия, чрез наблюдение на експериментални пилотни конструкции за продължителен период;
- Разширяване на изследванията върху други видове комбинации на агресивни среди и техните взаимодействия с бетона, за да се оптимизират рецептурите за разнообразни геоложки и експлоатационни условия;
- Работа по адаптиране на методите и моделите използвани в дисертацията към условията и материалите на българската строителна практика с фокус върху подземното строителство. Синхронизиране на изведената методика с актуализираната национална нормативна база за превенция на корозията на строителните конструкции, когато бъде налична.

14. Използвана литература по реда на цитиране в текста на дисертацията:

1. Odd E. Gjrv, Durability of Concrete Structures, March 2011, Arabian journal for science and engineering 36(2):151-172;
2. Andersg Lindvall, Environmental Actions and Response - Reinforced Concrete Structures exposed in Road and Marine Environments, Licentiate thesis, 2001, Chalmers, Department of Building Materials;
3. Шопов А., Изследване влиянието на корозията върху механичните свойства на строителна стомана за подземни съоръжения, дисертация за получаване на образователната и научна степен „доктор“, София 2021, МГУ „Св. Иван Рилски“;
4. Steinar Helland, Service life design of concrete structures: the limit state and reliability-based approach given in fib MC SLD and ISO 16204, January 2013, International Journal of Structural Engineering 4(1/2):14 – 23;
5. БДС EN 1990:2003 Еврокод: Основи на проектиране на строителните конструкции, БДС EN 1990 Национално приложение;
6. БДС EN 206:2013+A1:2016/NA:2017 Бетон Част 1: Спецификация, свойства, производство и съответствие;
7. M. G. Alexander, Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation, Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, e-ISSN: 2007-6835, 04 Jul 2018;
8. G. Nganga, M. G. Alexander, H. Beushausen, Practical implementation of the durability index performance-based design approach Construction and Building Materials, 45: 2013;
9. The influence of cement content on the performance of concrete, Concrete Society Discussion Document, Ref: CS 125 ISBN 0 946691 76 2 1999;
10. ISO 13823:2008, General principles on the design of structures for durability, International Organization for Standardization, Geneva: 2015;
11. БДС 9075:1989, Антикорозионна защита на строителните конструкции и съоръжения, изложени на действието на агресивни среди. Основни понятия. Класификация на агресивните среди, Български институт за стандартизация, 1.01.1989 г.;
12. БДС 9075:1989/Поправка:1990, Антикорозионна защита на строителните конструкции и съоръжения, изложени на действието на агресивни среди. Основни понятия. Класификация на агресивните среди, Български институт за стандартизация, 1.01.1990 г.;
13. Защита на строителните конструкции от корозия, норми и правила за проектиране, (Утвърдени със заповед № 1940 от 27.VI.1980 г. на МССМ и № 335 от 24.VI.1980 г. на КАБ);
14. Назърски Д., Дълготрайност на строителните материали, Университет по архитектура, строителство и геодезия, София, 1995 г.;
15. Борисов Б., „Влошаване на качествата на стоманобетонните конструкции, вследствие на алкало-силициева реакция“ – 67-ма международна научна конференция на МГУ. Секция „Добив и преработка на минерални суровини“. ISSN 2738-8816 (online). С. 16-21.;
16. IDRIS LIS-03 Durability Assessment Report LIS03-HDI-GEN-DES-RPT-00003-00, Revision 00, January 2016, Doha, Qatar;
17. Панайотова М., Корозия и защита от корозия в строителството, издателска къща „Св. Иван Рилски“, София, 2007;
18. Musaimeer Pumping Station and Outfall, Durability Assessment Report, C2017_109-RTP-GD-ST-GN-0020;
19. Bakhshi M., Nasri V., Durability Design of Segmental Linings for Intended Service Life of Tunnels, Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures Paper Number DDS02, 18 - 20 July 2018, University of Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom;
20. Wig RJ, Furguson LR (1917) What is the trouble with concrete in sea water? Eng News Rec 79:532, 641, 689, 737, 794;
21. Tuutti K (1982) Corrosion of steel in concrete. Report Fo 4-82. Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 469 pp. ISSN:0346-6906;
22. Ming Liu, Xuequn Cheng, Xiaogang Li, Corrosion Propagation Behavior of low-Cr steel Rebars in Simulated Concrete Environments, Int. J. Electrochem. Sci., 14 (2019) 726 – 742, doi: 10.20964/2019.01.55;
23. Life-365, Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Version 2.2.3, December 23, 2020;
24. Qatar Integrated Rail Project, Doha Metro: Gold Line, Segmental lining durability assessment, M006-GDB-TUN-RPT-00002, 05-JUNE-2014;
25. Keith Quillin, Modelling degradation processes affecting concrete, BRE Centre for Concrete Construction, Garston, Watford, WD25 9XX, 2001, BR 434 ISBN 1 86081 531 6;

26. Rodolph Abou Jaoude, Rami Khatib, Service life assessment of foundation and piles at Industrial – Mubaireek Interchange, ACTS -QC-20210246, Doha, 2021;
27. Design and Build Package 4 Green Line Underground, Durability Report Stations Shafts & In-situ Tunnels M008-PSH-STR-RPT-00001;
28. Димитров Б., Стоманобетонни конструкции, изд. „Техника“, София, 1993;
29. <https://www.britannica.com/technology/construction/Early-steel-frame-high-rises#ref105155>, (последно посетено 31.01.2024);
30. Richard W. S (1995). "History of Concrete". The Aberdeen Group. Archived from the original on 28 May 2015, retrieved 25 April 2015;
31. W. Morgan (1995). "Reinforced Concrete". The Elements of Structure. Archived from the original on October 12, 2018. Retrieved April 25, 2015 – via John F. Claydon's website;
32. Day, Lance (2003). Biographical Dictionary of the History of Technology. Routledge. p. 284. ISBN 0-203-02829-5;
33. Condit, Carl W. (January 1968). "The First Reinforced-Concrete Skyscraper: The Ingalls Building in Cincinnati and Its Place in Structural History". Technology and Culture. 9 (1): 1–33. doi:10.2307/3102041. JSTOR 3102041. S2CID 113019875;
34. Маноилов Л., Стоманобетон, изд. „Техника“, София, 2006;
35. Симеонов Й. и др., Строителни материали, изд. „Техника“, София, 1991;
36. Пенчев П., Петров Л., Петков В., Наръчник за бетона, издателство Техника, София, 1980 г.;
37. Даракчиев в Б. и др., Строителни Материали, изд. „Техника“, София, 1990;
38. Qatar Construction Specifications 2014 (QCS 2014);
39. Siddique R., Khan M. I. (2011), Supplementary Cementing materials, Springer – Verlag, Berlin Heidelberg;
40. Николов А., Геополимери на основа естествен зеолит за приложение в строителството. Състав, структура, свойства., Дисертационен труд за получаване на образователната и научна степен „доктор“, УАСГ, София, 2015;
41. <https://www.civilengineeringforum.me/fly-ash-classification-physical-and-chemical-properties/>, (последно посетено 16.07.2024);
42. M. Alexander and B. Magee, "Durability performance of concrete containing condensed silica fume," Cem. Concr. Res., vol. 29, no. 6, pp. 917–922, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00064-2;
43. Ahmed Tafroui, Gilles Escadeillas, Soltane Lebaili, Thierry Vidal, Metakaolin in the formulation of UHPC, 2009;
44. Mindess, S., 1988, "Bonding in Cementitious Composites: How Important is It?," Proceedings, Symposium on Bonding in Cementitious Composites, Boston, ed. S. Mindess and S. P. Shah, V. 114, Materials Research Society, Pittsburgh;
45. Стаменов Ст. и Николов И., Строителни материали и изпитването им, изд. „Техника“, София, 1978;
46. Кузманов П., Клас на бетона. Контрол и оценка, издателство Техника, София, 2011 г.;
47. Пеев А. и Чилев Т., Приготовление, транспорт и полагане на бетона, изд. „Техника“, София, 1991;
48. Panayotova, M., Introduction in corrosion and corrosion protection of metals, ISBN 978-954-353-465-4, Publishing House „Saint Ivan Rilski“, Sofia, 2023;
49. BS EN 12390-8:2009, Testing hardened concrete, Part 8: Depth of penetration of water under pressure;
50. БДС EN 206:2014/НА БЕТОН, Спецификация, свойства, производство и съответствие, Национално приложение (NA);
51. ASTM Designation: C1202 – 12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration;
52. Anya Vollpracht, Volkert Feldrappe, Steffen Overmann, Johannes Haufe, Andreas Ehrenberg, Ralf Beutel, Thomas Matschei, Performance-Prüfverfahren für den Sulfatwiderstand von Beton, ce/papers 6 (2023), No. 6, Published by Ernst & Sohn GmbH;
53. ASTM G 109 Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments;
54. ACI 365.1R-00, Service Life Prediction State of the Art Report;
55. <https://izolacii.eu/resheniya-na-sika-za-remont-na-strukturi-stradashti-ot-alkalo-silitsieva-reaktsiya/>, последно посетено 12.10.2024);
56. AS 2159—1995, Australian Standard, Piling—Design and installation, published by standards Australia, (standards association of Australia) 1 the crescent, Homebush, nsw 2140, SBN 0 7262 9884 0;
57. BRE Special Digest 1:2005, Concrete in aggressive ground;
58. Корозия на стоманената армировка в бетона, списание Строители, година IV, брой 1, февруари 2007;
59. BRE Centre for Concrete Construction, Digest 444, Part 1-3, Corrosion of steel in concrete Durability of reinforced concrete structures, CI/SfB q4 February 2000;
60. John P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, investigation and repair,

Simultaneously published in the USA and Canada by Taylor & Francis, 2007, ISBN 0-203-41460-8 Master e-book ISBN;

61. Wilkins, N J M and Sharp, J V, 1990, "Localised corrosion of reinforcement in marine concrete", "Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete", edited by Page, C L, Treadaway, K W J, and Bamforth, P B, Society of Chemical Industry, Elsevier Applied Science, pp. 3-18;
62. Beeby, A W, 1978, "Cracking and Corrosion", "Concrete in the Oceans" Technical Report No. 1.
63. Browne, R D, 19-20 February 1986, "Low Maintenance Concrete - Specification Versus Practice?", paper presented at "Maintenance of Maritime and Offshore Structures", Institution of Civil Engineers, London;
64. Gjorv, O E, April 1994, "Steel Corrosion in Concrete Structures Exposed to Norwegian Marine Environment", ACI Concrete International, pp. 35-39;
65. Standards Australia, 1996, "Guide to Concrete Repair and Protection", ACRA, CSIRO, SA and SNZ publication;
66. Clear, C A, May 1985, "The Effects of Autogeneous Healing upon the Leakage of Water through Cracks in Concrete", Cement and Concrete Association Technical Report 559;
67. Neville, A, AUTOGENOUS HEALING: A CONCRETE MIRACLE?, 2002, Volume: 24, Issue Number: 11, Publisher: American Concrete Institute (ACI), ISSN: 0162-4075, p. 76-82;
68. Edvardsen, C. (1999) Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. Materials Journal, 96(4), 448454;
69. M. W Loving, Concrete pipe in american sewerage practice, Chicago 1938. Bulletin 17 of American Concrete Pipe Association. 8vo., about 90pp., photo illustrations, limp boards. VG;
70. BS 534:1990 Specification for steel pipes, joints and specials for water and sewerage, ISBN 0580188175;
71. Schiessl P., Reuter C. (1992), Massgebende Ein-flussgrössen auf die Wasserdurchlässigkeit von gerissenen Stahlbetonbauteilen, Ann. Report, Institut f'ur Bauforschung, Aachen, 223-228;
72. BS EN 1992-3:2006, Eurocode 2 — Design of concrete structures — Part 3: Liquid retaining and containment structures;
73. Hans-Wolf Reinhardt, Martin Jooss, Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, Cement and Concrete Research Volume 33, Issue 7, July 2003, Pages 981-985;
74. Wang et al, Permeability Study of Cracked Concrete, March 1997 Cement and Concrete Research 27(3):381-393, DOI:10.1016/S0008-8846(97)00031-8;
75. БДС EN 1991-1-1:2004/NA:2008, Еврокод 1: Въздействия върху строителните конструкции, ICS 91.010.30;
76. НАРЕДБА № 3 от 21 юли 2004 г За основните положения за проектиране на конструкциите на строежите и за въздействията върху тях, Издадена от министъра на регионалното развитие и благоустройството, Обн. ДВ. бр. 92 от 15 Октомври 2004 г., попр. ДВ. бр. 98 от 5 Ноември 2004 г., изм. ДВ. бр. 33 от 15 Април 2005 г.;
77. Jensen, J. L. W. V. (1906). "Sur les fonctions convexes et les inégalités entre les valeurs moyennes". Acta Mathematica. 30 (1): 175–193. doi:10.1007/BF02418571;
78. AJM Siemes and S Rostam, 'Durability, safety and serviceability – a performance based design', IABSE colloquium: basis of design and action on structures, Delft, March 27-29 1996, TNO report No. 96-BT-R0437-001;
79. AV Saetta, RV Scotta & RV Vitaliani, 'Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete', ACI Materials Journal, 90, 441-451 (1993);
80. P Bamforth et al, 'Guidance on the selection of measures for enhancing reinforced concrete durability', Taywood Engineering Ltd Report No 1304/98/10349, Taywood Engineering Ltd, Southall, Middlesex, UK, March 1999 (in press);
81. L-O Nilsson, 'On the uncertainty of service life models for reinforced marine concrete structures', in Life prediction and ageing management of concrete structures, Proc Int. RILEM Workshop, Ed. D Naus, (2000);
82. G Sergi, SW Yu and CL Page, 'Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment', Mag. Conc. Res., 44, 63 (1992);
83. M Alisa, Corrosion of reinforcement in concrete caused by wetting and drying cycles in chloride-containing environments. Appendix 6, Modelling ingress of chloride in concrete (2000);
84. RD Browne, Design prediction of the life of reinforced concrete in marine and other chloride environments', Durability of Building Materials, Elsevier Science Publishing Co. Vol. 3, 1982;
85. P Vassie, Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges', Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, 76, 713 (1984);F
86. L.-O. Nilsson, P. Sandberg, E. Poulsen, Tang L., A. Andersen & J.M. Frederiksen from HETEK, A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background;
87. L.-O. Nilsson, P. Sandberg, E. Poulsen, Tang L., A. Andersen & J.M. Frederiksen from HETEK, A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background, Danish Road Directorate, Report No. 54 (1997);
88. C Andrade and MC Alonso, 'Values of corrosion rate of steel in concrete to predict

- service life of concrete structures', in 'Application of accelerated corrosion tests to service life prediction of materials', ASTM STP 1194 (Ed. G Cragnolino & N Sridhar), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 282-295 (1994);
89. JA Gonzalez, C Andrade, C Alonso & S Feliu, 'Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration of concrete embedded steel reinforcement', *Cem. Conc. Res.*, 25, p257-264 (1995);
 90. Technical Report 61: Part 1 Enhancing reinforced concrete durability: Guidance on selecting measures for minimizing the risk of corrosion of reinforcement in concrete, 2004, ISBN 9781904482116;
 91. CL Page, NR Short & A El Tarras, 'Diffusion of chloride ions in hardened cement paste', *Cem. Conc. Res.*, 11, 395 – 406 (1981);
 92. A Neville, 'Chloride attack of reinforced concrete: an overview', *Materials and Structures*, 28, 63 (1995);
 93. SE Benjamin and JM Sykes, 'Chloride induced pitting corrosion of Swedish iron in ordinary Portland cement mortars and alkaline solutions: the effect of temperature. 3rd Int Symp. on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, Ed. Page, K Treadaway & P Bamforth, (1990);
 94. CS 163, Guide to the design of concrete structures in the Arabian Peninsula, 2008;
 95. Чонков Т., Строителство на подземни съоръжения (Специални начини), Печатна база към МКНП, София, 1989;
 96. <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/avn-machine/>, последно посетено 12.12.2023;
 97. Basil Awwad, Borislav Borisov, Method statement for production of precast reinforced concrete jacking pipe and shaft elements, project ID: IA 13/14 с 41 m, LIS03-HDI-GEN-CON-MST-00019, Date : 03-05-2016, Doha, Qatar;
 98. AS 3735—2001, AS 3735—2001, Australian Standard TM, Concrete structures for retaining liquids;
 99. CSA A23.1:24/CSA A23.2:24, Concrete materials and methods of concrete construction/Test Methods and Standard Practices for concrete, SKU: 2701210;
 100. BS 8500-1:2015+A1:2016, Concrete –Complementary British Standard to BS EN 206 Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier, BSI Standards Publication;
 101. BS 8500-1:2015+A1:2016, Concrete –Complementary British Standard to BS EN 206 Part 2: Specification for constituent materials and concrete, BSI Standards Publication;
 102. BS 8500-2:2002 Incorporating Amendment No. 1, Concrete —Complementary British Standard to BS EN 206-1 — Part 2: Specification for constituent materials and concrete, BSI Standards Publication;
 103. BS 5911-1:2002 Concrete pipes and ancillary concrete products — Part 1: Specification for unreinforced and reinforced concrete pipes (including jacking pipes) and fittings with flexible joints (complementary to BS EN 1916:2002) +A2:2010, BSI 2010;
 104. Walker, M (ed), Guide to the construction of reinforced concrete in the Arabian Peninsula, CIRIA Publication C577, Concrete Society Special Publication CS 136;
 105. BS EN 1916:2002 Incorporating corrigenda December 2003, December 2006 and April 2008 Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced;
 106. AS/NZS 4058: 2007 Precast concrete pipe (pressure and non-pressure);
 107. <https://www.corrosionpedia.com/definition/2523/coal-tar-epoxy>, последно посетено 17.04.2024;
 108. fib Bulletin 34: Model code for Service Life Design;
 109. Muhammad Umar Khan, Shamsad Ahmad, and Husain Jubran Al-Gahtani, Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete: An Overview on Chloride Diffusion and Prediction of Corrosion Initiation Time, *International Journal of Corrosion* Volume 2017, Article ID 5819202];
 110. Y. T. Puyate; C. J. Lawrence; N. R. Buenfeld; I. M. McLoughlin, Chloride transport models for wick action in concrete at large Peclet number, *Physics of Fluids* 10, 566–575 (1998);
 111. Karimi & Buenfeld DTI publication "Service Life Prediction of Concrete Structures based on Automated Monitoring" 2007;
 112. NT BUILD 443, Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments;
 113. NT BUILD 492, Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration
 114. Bader, M. (2003). Performance of concrete in a coastal environment. *Cement and concrete composites*, Volume 25, p539-548
 115. De Rooij, M. R., Polder, R.B. (2004). What diffusion coefficient is used for chloride diffusion modelling? *Advances in concrete through science and engineering*, RILEM, Evanston
 116. Azad AK et al, Chloride Penetration into Silica Fume Concrete Subject to Different Exposures, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 31, Number 1C, pp 93-106, June 2006;
 117. Bamforth, PB, Hurley, SA, Price, WB, AL-ISA, M "Durability and Repair of R.C. Structures in Saudi Arabia", Taywood Engineering Report No. 1303S/96/9384 for Saudi Armaco (Confidential), 1996;
 118. R. Ferreira, Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment, Corpus ID:

108993700, 2004;

119. Николина М. Василева, Лекции по Теория на вероятностите и математическа статистика, Минно-геоложки университет „Свети Иван Рилски“, София, 2006;

120. Златанов П., Моделиране и управление на технологичните процеси в откритите рудници, издателство Авангард Прима, 2010 г.;

Списък на публикациите по темата на дисертационния труд

•Борисов Б., „Подземни хидроизолации – необходимост, специфики и видове” - списание „Ютилитис”, бр. 9 (59), септември 2008;

•Борисов Б., „Експлоатационен срок на подземни стоманобетонни елементи и облицовки”, - списание „Минно дело и геология”, бр. 8-9, 2021. ISSN 2603-4549 (Online). С. 61-68.;

•Борисов Б., „Влошаване на качествата на стоманобетонните конструкции, вследствие на алкало-силициева реакция” – 67-ма международна научна конференция на МГУ. Секция „Добив и преработка на минерални суровини”. ISSN 2738-8816 (online). С. 16-21.