



Universitatea Tehnică a Moldovei

**STUDIUL INFLUENȚEI FACTORILOR CU  
PROCES DE CARBONATARE ȘI ÎNGHEȚ-  
DEZGHEȚ ASUPRA DURABILITĂȚII  
CONSTRUCȚIILOR DIN BETON ARMAT**

**Masterand:**

**Gobelez Denis**

**Conducător:**

**Sidorenco Elena  
conferențiar universitar  
doctor în științe tehnice**

**Chișinău, 2025**

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII MOLDOVA**

**Universitatea Tehnică a Moldovei**

**Facultatea Construcții, Geodezie și Cadastru**

**Departamentul Inginerie Civilă și Geodezie**

**Admis la susținere:**

**Șef departament ICG, conf. univ., dr.**

\_\_\_\_\_ **A. Taranenco**

“ ” \_\_\_\_\_ **2025**

**STUDIUL INFLUENȚEI FACTORILOR CU PROCES DE  
CARBONATARE ȘI ÎNGHEȚ-DEZGHEȚ ASUPRA  
DURABILITĂȚII CONSTRUCȚIILOR DIN BETON ARMAT**

**Teză de master**

**Student: \_\_\_\_\_ Gobelez Denis, IS-2301M**

**Conducător: \_\_\_\_\_ Sidorenco Elena, conf. univ., dr.**

**Chișinău, 2025**

## REZUMAT

**Gobelez, Denis. Studiul influenței factorilor cu proces de carbonatare și îngheț-dezgheț asupra durabilității construcțiilor din beton armat.** Lucrarea investighează influența proceselor de carbonatare și îngheț-dezgheț asupra durabilității structurilor din beton armat. Betonul, deși unul dintre cele mai utilizate materiale, este expus unor factori de degradare care reduc durata de viață a construcțiilor. În acest context, analiza se concentrează pe aplicarea diferitelor modele teoretice pentru a evalua adâncimea carbonatării și efectele ciclurilor de îngheț-dezgheț, utilizând date specifice Republicii Moldova. Modelele folosite pentru carbonatare includ formula clasică, Papadakis și DurarCalc, iar pentru îngheț-dezgheț au fost aplicate modelele Powers & Helmuth, Fagerlund, Li, Bazant & Kaplan și EN 12390-9.

Rezultatele au evidențiat diferențe semnificative între modele. Modelul EN 12390-9 este considerat cel mai potrivit pentru condițiile locale datorită compatibilității cu standardele europene și oferă estimări echilibrate ale pierderilor de masă și ale adâncimii fisurilor cauzate de îngheț. În același timp, modelul Papadakis a demonstrat o predicție mai conservatoare a adâncimii carbonatării, ceea ce îl face relevant pentru mediile urbane și industriale. Modelele Powers & Helmuth și Bazant & Kaplan au oferit rezultate mai conservatoare, fiind utile pentru proiectarea unor măsuri preventive suplimentare.

Analiza comparativă a modelelor a arătat că modelele conservatoare tind să ofere estimări mai ridicate ale degradării, ceea ce poate conduce la proiectarea unor măsuri suplimentare de protecție. În schimb, metodele standardizate, precum EN 12390-9, oferă o abordare echilibrată, fiind mai ușor de aplicat în practică. Aceste modele pot fi integrate în proiectele de infrastructură locală, având în vedere compatibilitatea cu normativele naționale și europene. De asemenea, analiza a evidențiat necesitatea adoptării unor măsuri preventive pentru a asigura durabilitatea structurilor, precum utilizarea aditivilor de aerare, protecția armăturilor împotriva coroziunii și monitorizarea periodică a stării betonului. Implementarea acestor măsuri poate contribui semnificativ la prelungirea duratei de viață a construcțiilor și la reducerea costurilor de întreținere pe termen lung.

Lucrarea este compusă din introducere, trei capitole, concluzii și bibliografie. Teza conține 80 de pagini, 8 de figuri și 17 tabele. Bibliografia include 83 de surse de referință.

**Cuvinte-cheie:** carbonatare, îngheț-dezgheț, durabilitate beton, metode de calcul, modele predictive.

## SUMMARY

**Gobelez, Denis. Study of the Influence of Carbonation and Freeze-Thaw Processes on the Durability of Reinforced Concrete Structures.** This paper investigates the influence of carbonation and freeze-thaw processes on the durability of reinforced concrete structures. Concrete, although one of the most widely used construction materials, is exposed to degradation factors that reduce the lifespan of constructions. In this context, the analysis focuses on applying various theoretical models to evaluate carbonation depth and the effects of freeze-thaw cycles using data specific to the Republic of Moldova. The models used for carbonation include the classical formula, Papadakis, and DurarCalc, while the models applied for freeze-thaw processes are Powers & Helmuth, Fagerlund, Li, Bazant & Kaplan, and EN 12390-9.

The results showed significant differences between the models. The EN 12390-9 model is considered the most suitable for local conditions due to its compatibility with European standards and its balanced estimates of mass losses and crack depths caused by freezing. At the same time, the Papadakis model demonstrated a more conservative prediction of carbonation depth, making it relevant for urban and industrial environments. The Powers & Helmuth and Bazant & Kaplan models provided more conservative results, being useful for designing additional preventive measures.

The comparative analysis of the models showed that conservative models tend to offer higher degradation estimates, which can lead to designing additional protection measures. In contrast, standardized methods like EN 12390-9 offer a more balanced approach and are easier to apply in practice. These models can also be integrated into local infrastructure projects due to their compatibility with national and European standards. Additionally, the analysis highlighted the necessity of adopting preventive measures to ensure the durability of structures, such as using air-entraining additives, protecting reinforcements against corrosion, and periodically monitoring the condition of concrete. Implementing these measures can significantly contribute to extending the lifespan of constructions and reducing long-term maintenance costs. The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a bibliography.

The paper contains 80 pages, 8 figures, and 17 tables. The bibliography includes 83 reference sources.

**Keywords:** carbonation, freeze-thaw, concrete durability, calculation methods, predictive models.

## CUPRINS

INTRODUCERE .....	7
1. ANALIZA SITUAȚIEI ÎN DOMENIUL DURABILITĂȚII CONSTRUCȚIILOR.....	9
2. ANALIZA PROCESELOR DE DEGRADARE .....	10
2.1. Modele matematice bazate pe curbe pentru adâncimea carbonatării betonului .....	12
2.2. Modele de predicție bazat pe învățare automată.....	14
2.3. Model de predicție bazat pe arbori de decizie (DT) .....	16
2.4. Modelul de predicție bazat pe SVM .....	17
2.5. Alte modele de predicție .....	18
2.6. Comparare între modelele de învățare automată .....	18
2.7. Provocări și îmbunătățiri sugestionate .....	19
2.8. Concluzii .....	20
2.9. Studiul mecanismului de deteriorare și al modelului de evoluție a betonului sub cicluri de îngheț-dezghet.....	20
2.10. Schema experimentală .....	22
2.11. Rezultate experimentale și analiza rezultatelor.....	25
3. EVALUAREA DURABILITĂȚII STRUCTURILOR DIN BETON ARMAT EXPUSE PROCESELOR DE DEGRADARE.....	29
3.1. Calcule pentru adâncimea de carbonatare.....	29
3.2. Calcule cu diferite modele pentru îngheț-dezghet. Modelul Powers & Helmuth.....	38
3.3. Modelul de testare conform EN 12390-9.....	46
3.4. Modelul Li .....	54
3.5. Modelul Fagerlund.....	61
3.6. Modelul Bazant & Kaplan .....	66
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI .....	72
BIBLIOGRAFIE .....	74

## INTRODUCERE

Durabilitatea construcțiilor din beton armat reprezintă un subiect central în domeniul ingineriei civile, având un impact semnificativ asupra siguranței și performanței structurilor pe termen lung. Betonul armat este utilizat pe scară largă în realizarea infrastructurii urbane și industriale datorită proprietăților sale mecanice și costurilor reduse. Cu toate acestea, expunerea la factorii de mediu precum dioxidul de carbon și ciclurile repetate de îngheț-dezghet poate provoca procese de degradare care afectează durabilitatea și siguranța structurilor. În contextul actual al schimbărilor climatice și al creșterii concentrației de CO<sub>2</sub> în atmosferă, evaluarea impactului acestor procese devine esențială. Republica Moldova se confruntă cu variații semnificative de temperatură și umiditate pe parcursul anului, ceea ce determină expunerea continuă a structurilor din beton armat la condiții care favorizează aceste procese de degradare.

Scopul principal al acestei lucrări este de a analiza influența proceselor de carbonatare și îngheț-dezghet asupra durabilității construcțiilor din beton armat și de a propune soluții practice pentru îmbunătățirea rezistenței structurilor în condițiile climatice specifice Republicii Moldova. Pentru atingerea acestui scop, cercetarea își propune să aplice și să compare diferite modele teoretice de calcul pentru a evalua adâncimea carbonatării, pierderile de masă și reducerea rezistenței betonului. Ipoteza cercetării pornește de la premisa că aplicarea unor metode adecvate de calcul și prevenire a degradării poate contribui semnificativ la prelungirea duratei de viață a construcțiilor și la reducerea costurilor de întreținere.

Metodologia de cercetare a constat în aplicarea mai multor modele teoretice pentru analiza carbonatării și a înghețului-dezghetului. Pentru analiza carbonatării au fost utilizate formula clasică, modelul Papadakis și metoda DurarCalc, iar pentru îngheț-dezghet au fost aplicate modelele Powers & Helmuth, Fagerlund, Li, Bazant & Kaplan și EN 12390-9. Aceste modele au fost alese pentru a oferi o perspectivă comparativă asupra efectelor proceselor de degradare în funcție de tipul cimentului, raportul apă/ciment și durata de expunere. Justificarea utilizării acestor modele constă în capacitatea lor de a lua în considerare factorii de mediu relevanți pentru Republica Moldova și de a propune soluții pentru reducerea efectelor negative ale carbonatării și înghețului-dezghetului.

Teza este structurată în trei capitole principale. Primul capitol prezintă o revizuire a literaturii de specialitate privind procesele de carbonatare și îngheț-dezghet în beton, evidențiind factorii care influențează aceste procese și metodele de prevenire propuse în diferite studii. Al doilea capitol detaliază metodologia de cercetare utilizată, descriind modelele teoretice aplicate și datele specifice utilizate în calcul. Al treilea capitol prezintă analiza comparativă a modelelor

aplicate și soluțiile propuse pentru gestionarea efectelor proceselor de degradare asupra betonului armat.

Una dintre limitările cercetării este disponibilitatea redusă a datelor locale privind concentrația de CO<sub>2</sub> și numărul exact de cicluri de îngheț-dezgheț înregistrate anual. Cu toate acestea, estimările utilizate în calcul sunt conforme cu valorile medii raportate în literatura de specialitate și în normele internaționale. Cercetarea beneficiază de facilități importante, cum ar fi compatibilitatea modelelor utilizate cu normativele europene și accesul la date climatice locale relevante. Aceste aspecte permit formularea unor recomandări practice care pot fi aplicate direct în proiectele de infrastructură din Republica Moldova.

## CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Concluziile și recomandările din această lucrare reflectă rezultatele esențiale obținute în urma analizei proceselor de carbonatare și îngheț-dezghet asupra structurilor din beton armat, adaptate condițiilor specifice Republicii Moldova. Lucrarea a oferit o evaluare comparativă a diverselor modele de calcul utilizate pentru a determina adâncimea carbonatării și efectele ciclurilor de îngheț-dezghet, identificând soluții practice pentru creșterea durabilității structurilor din beton armat.

Analiza carbonatării a demonstrat că modelul DurarCalc este cel mai eficient pentru condițiile locale, datorită capacității sale de a integra factori specifici precum umiditatea relativă și concentrația de CO<sub>2</sub>. Modelul Papadakis, deși mai conservator, este util pentru mediile urbane și industriale, unde expunerea la CO<sub>2</sub> este mai intensă. În cazul procesului de îngheț-dezghet, modelul EN 12390-9 s-a dovedit cel mai potrivit pentru Republica Moldova, datorită compatibilității cu standardele europene și adaptabilității la variațiile climatice locale. Totodată, modelele conservatoare precum Powers & Helmut și Bazant & Kaplan oferă estimări mai ridicate ale degradării, fiind adecvate pentru proiectarea unor măsuri suplimentare de protecție.

Analiza comparativă a relevat că modelele conservatoare tind să supraestimeze degradarea, ceea ce poate duce la costuri mai mari pentru măsuri de protecție. În schimb, modelele standardizate, precum EN 12390-9, oferă un echilibru între precizie și aplicabilitate practică, fiind recomandate pentru utilizarea în proiectele de infrastructură locală. Factori precum umiditatea relativă, gradul de saturare cu apă și temperatura joacă un rol esențial în procesul de degradare, iar luarea în considerare a acestora este crucială în toate etapele de proiectare și întreținere a structurilor.

Pentru a spori durabilitatea betonului armat, se recomandă utilizarea aditivilor de aerare, aplicarea straturilor de protecție împotriva coroziunii pe armături și introducerea unor sisteme de monitorizare a stării betonului. De asemenea, integrarea modelelor testate, precum EN 12390-9 și DurarCalc, în normativele naționale, ar reflecta mai bine condițiile climatice și de mediu specifice Republicii Moldova. Cercetările viitoare ar trebui să se concentreze pe dezvoltarea unor modele hibride care să combine avantajele modelelor existente și să ofere predicții mai precise. Totodată, crearea unor baze de date locale privind ciclurile de îngheț-dezghet și concentrația de CO<sub>2</sub> ar contribui semnificativ la îmbunătățirea preciziei analizelor viitoare.



Prin aplicarea concluziilor și recomandărilor din această lucrare, se pot adopta măsuri practice pentru prelungirea duratei de viață a structurilor din beton armat, reducând astfel costurile de întreținere și impactul negativ al factorilor de mediu asupra infrastructurii.

## BIBLIOGRAFIE

1. **Gobelez Denis, Elena Sidorenco.** „The Carbonation Process in Reinforced Concrete Structures”, ConsGeoCad, Scientific Symposium at Technical University of Moldova, 2024.
2. **Pei, X.J.** „Research progress on concrete carbonation and prediction models. ” China Cement 2016, 3, 78-81.
3. **Wang, X.; Yang, Q.; Peng, X.; Qin, F.** “A Review of Concrete Carbonation Depth Evaluation Models”, Coatings 2024, 14, 386.
4. **Medvedev, V.; Pustovgar, A.** „A Review of Concrete Carbonation and Approaches to Its Research under Irradiation” Buildings 2023, 13, 1998
5. **Taffase, W.Z; Sistonen, E.; Puttonen, J.** „Carbonation prediction model for reinforced concrete using machine learning methods” Constr. Build. Mater. 2015, 100, 70-82
6. **Jiang, C.; Gu, X; Huang, Q.; Zhang, W.** „Carbonation depth predictions in concrete bridges under changing climate conditions and increasing traffic loads” Cem. Concr. Compos. 2018, 93.
7. **Forsdyke, J.C.; Lees, J.M.** „Model fitting to concrete carbonation data with non-zero initial carbonation depth” Mater. Struct. 2023, 56, 22.
8. **Fuhaid, A.F.A.; Niaz, A.** „Carbonation and corrosion problems in reinforced concrete structures” Buildings 2022, 12, 586.
9. **Jeong, H.; Jung, B.J.; Kim, J.H.; Seo, S.Y.; Kim, K.S.** „Development and assessment of Nile blue-immobilized pH sensor to monitor the early stage of concrete carbonation” J. Build. Eng. 2022, 62, 105319.
10. **Lele, H.R.F.; Beushausen, H.; Alexander, M.G.** „A practical carbonation model for service life design of reinforced concrete structures” Sci. Afr. 2023, 20, e01677.
11. **Xu, Z.; Zhang, Z.; Huang, J.; Yu, K.; Zhong, G.; Chen, F.; Chen, X.; Yang, W.; Wang, Y.** „Effects of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration on carbonation of cement-based materials: A review” Constr. Build. Mater. 2022, 346, 128399.
12. **Carino, N.J.; Lew, H.S.** „The Maturity Method: From Theory to Application. Structures 2001, A Structural Engineering Odyssey” 2001, pp. 1-19.
13. **Viviani, M.; Glisic, B.; Smith, I.F.** „Three-day prediction of concrete compressive strength evolution” ACI Mater. J. 2005,102, 231-236.
14. **Yang, Q.; Wang, X.; Peng, X.; Qin, F.** “General Curve Model for Evaluating Mechanical Properties of Concrete at Different Ages” Coatings 2023, 13, 2002.
15. **Peng, X.; Yang, Q.; Cao, H.; Wang, H.** „Mathematical Model for Early-Aged UHPFRC Compressive Strength Changes” Coatings 2023, 13, 525.

16. **Zhang, K.; Xiao, J.** „Prediction model of carbonation depth for recycled aggregate concrete” *Cem. Concr. Compos.* 2018, 88, 86-99.
17. **Jiang, L.; Lin, B.; Cai, Y.** „A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete” *Cem. Concr. Res.* 2000, 30, 699-702.
18. **Ekolu, S.O.** „Model for natural carbonation prediction (NCP): Practical application worldwide to real life functioning concrete structures” *Eng. Struct.* 2020, 224, 111126.
19. **Ati, C.D.** „Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash” *Constr. Build. Mater.* 2003, 17, 147-152.
20. **Hashim, F.A.; Mostafa, R.R.; Hussien, A.G.; Mirjalili, S.; Sallam, K.M.** „Fick’s Law Algorithm: A physical law-based algorithm for numerical optimization” *Knowl.- Based Syst.* 2023, 260, 110146.
21. **Papadakis, V.G.; Vayenas, C.G.; Fardis, M.N.** „Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation.” *Mater. J.* 1991, 88, 363–373
22. **Papadakis, V.; Vayenas, C.; Fardis, M.** „Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete.” *ACI Mater. J.* 1991, 88, 186–196.
23. **Papadakis, V.G.; Vayenas, C.G.; Fardis, M.N.** „Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem.” *Chem. Eng. Sci.* 1991, 46, 1333–1338.
24. **Possan, E.; Andrade, J.; Dal Molin, D.; Ribeiro, J.** „Model to estimate concrete carbonation depth and service life prediction.” *Hygrothermal Behav. Build. Pathol.* 2021, 67–97.
25. **Liang, M.T.; Qu, W.; Liang, C.-H.** „Mathematical modeling and prediction method of concrete carbonation and its applications.” *J. Mar. Sci. Technol.* 2002, 10, 128–135.
26. **Ekolu, S.O.** „Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation.” *Cem. Concr. Compos.* 2018, 86, 40–56.
27. **Liang, M.-T.; Lin, S.-M.** „Mathematical modeling and applications for concrete carbonation.” *J. Mar. Sci. Technol.* 2003, 11, 3
28. **Lu, C.H.; Wu, W.L.; Zhao, Y.G.** „Research on prediction models for carbonation depth of concrete and prestressed concrete structures.” *J. Railw. Sci. Eng.* 2015, 12, 368–375.
29. **Li, B.; Tian, T.; Jin, N.G.; Jin, X.Y.** „A prediction model for concrete carbonation depth based on cement hydration.” *J. Water Resour.* 2015, 46, 109–117.
30. **Wang, X.D.; Ouyang, P.** “A review of the application of artificial neural networks in the field of concrete structures.” *Low Temp. Build. Technol.* 2022, 44, 75–78.
31. **Topcu, I.B.; Saridemir, M.** “Prediction of properties of waste AAC aggregate concrete using artificial neural network.” *Comput. Mater. Sci.* 2007, 41, 117–125.
32. **Gan, H.L.; Guo, R.K.** “Prediction of Concrete Carbonization Depth Based on PCA-BP

Principle.” *Technol. Bull.* 2019, 35, 144–149+154.

33. **Bu, N.; Yang, G.; Zhao, H.** „Prediction of concrete carbonization depth based on DE-BP neural network.” In Proceedings of the 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application, Nanchang, China, 21–22 November 2009; Volume 3, pp. 240–243.
34. **Yu, Z.; Haghghat, F.; Fung, B.C.; Yoshino, H.** “A decision tree method for building energy demand modeling.” *Energy Build.* 2010, 42, 1637–1646.
35. **Deng, C.Q.; Zheng, Y.Z.; Liu, X.; Wu, P.** “Research and exploration of concrete rebound strength curve in Shenzhen area based on decision tree algorithm.” *Build. Superv. Test. Cost* 2022, 15, 36–41.
36. **Breiman, L.** “Random forests.” *Mach. Learn.* 2001, 45, 5–32.
37. **Cutler, A.; Cutler, D.R.; Stevens, J.R.** “Random forests.” *Ensemble Mach. Learn. Methods Appl.* 2012, 157–175.
38. **Wu, X.G.; Wang, L.; Deng, T.T.; Hu, Y.; Yuan, F.Y.** “Early carbonation prediction of concrete based on random forest.” *J. Civ. Eng. Manag.* 2020, 37, 14–19+26.
39. **Londhe, S.; Kulkarni, P.; Dixit, P.; Silva, A.; Neves, R.; De Brito, J.** “Tree based approaches for predicting concrete carbonation coefficient.” *Appl. Sci.* 2022, 12, 3874.
40. **Hong, W.C.; Pai, P.F.** “Potential assessment of the support vector regression technique in rainfall forecasting.” *Water Resour. Manag.* 2007, 21, 495–513.
41. **Chen, Z.; Lin, J.; Sagoe-Crentsil, K.; Duan, W.** “Development of hybrid machine learning-based carbonation models with weighting function.” *Constr. Build. Mater.* 2022, 321, 126359.
42. **Uwanuakwa, I.D.** “Deep learning modelling and generalisation of carbonation depth in fly ash blended concrete.” *Arab. J. Sci. Eng.* 2021, 46, 4731–4746.
43. **Liu, X.; Wang, S.M.; Lu, L.; Chen, M.Z.; Di, Y.** “Research progress in predicting the durability of concrete materials using machine learning.” *J. Ceram.* 2023, 51, 2062–2073.
44. **Çevik, A.; Kurtoglu, A.E.; Bilgehan, M.; Gülsan, M.E.; Albegmprli, H.M.** “Support vector machines in structural engineering: A review.” *J. Civ. Eng. Manag.* 2015, 21, 261–281.
45. **Chaabene, W.B.; Flah, M.; Nehdi, M.L.** “Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: Critical review.” *Constr. Build. Mater.* 2020, 260, 119889.
46. **Zhang, K.; Zhang, K.; Bao, R.; Liu, X.** “A framework for predicting the carbonation depth of concrete incorporating fly ash based on a least squares support vector machine and metaheuristic algorithms.” *J. Build. Eng.* 2023, 65, 105772.
47. **Li, Z.; He, H.; Zhao, S.** “Research on support vector machine’s prediction of concrete carbonization.” In Proceedings of the 2008 International Seminar on Business and Information

Management, Wuhan, China, 19 December 2008; Volume 1, pp. 319–322.

48. **Hao, W.F.; Gu, J.Z.; Tang, C.** “Study on carbonation depth of prestressed concrete using wavelet support vector machine.” *Ind. Archit.* 2009, 39, 931–934.
49. **Liu, K.; Alam, M.S.; Zhu, J.; Zheng, J.; Chi, L.** “Prediction of carbonation depth for recycled aggregate concrete using ANN hybridized with swarm intelligence algorithms.” *Constr. Build. Mater.* 2021, 301, 124382.
50. **Zhao, N.; Lian, S.** “Damage Mechanism and Evolution Model of Concrete under Freeze-Thaw Cycles”, *Appl. Sci.* 2024, 14, 7693.
51. **Xiang, W.; Liu, X.** “Experimental study of mechanical properties of combined specimen with rock and shotcrete under freezingthawing cycles.” *Chin. J. Rock Mech. Eng.* 2010, 29, 2510–2521.
52. **Suzuki, T.; Ogata, H.; Takada, R.; Aoki, M.; Ohtsu, M.** “Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete.” *Constr. Build. Mater.* 2010, 24, 2347–2352.
53. **Shi, X.; Fay, L.; Peterson, M.M.; Yang, Z.** „Freeze-thaw damage and chemical change of a Portland cement concrete in the presence of diluted deicers.” *Mater. Struct.* 2010, 43, 933–946.
54. **Ohtsu, M.** “Nondestructive evaluation of damaged concrete due to freezing and thawing by elastic-wave method.” *J. Adv. Concr. Technol.* 2005, 3, 333–341.
55. **Wang, X.; Wu, Y.; Shen, X.; Wang, H.; Liu, S.; Yan, C.** “An experimental study of a freeze-thaw damage model of natural pumice concrete.” *Powder Technol.* 2018, 339, 651–658.
56. **Wang, Y.; Cao, Y.** “Water absorption and chloride diffusivity of concrete under the coupling effect of uniaxial compressive load and freeze–thaw cycles.” *Constr. Build. Mater.* 2019, 209, 566–576.
57. **Rong, X.L.; Zheng, S.S.; Zhang, Y.X.** “Experimental study on the seismic behavior of RC shear walls after freeze-thaw damage.” *Eng. Struc.* 2020, 206, 110101.
58. **Yazdani, F.** “*Damage Assessment, Characterization, and Modeling for Enhanced Design of Concrete Bridge Decks in Cold Regions*” North Dakota State University: Fargo, ND, USA, 2015.
59. **Ronning, T.F.** “*Freeze-Thaw Resistance of Concrete: Effect of Curing Conditions, Moisture Exchange and Materials*” Norwegian Institute of Technology: Trondheim, Norway, 2001.
60. **Shang, H.S.; Song, Y.P.** “Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles.” *Cement. Concr. Res.* 2006, 36, 1857–1864.

61. **Wang, W.; Yang, X.; Huang, S.; Yin, D.; Liu, G.** “Experimental study on the shear behavior of the bonding interface between sandstone and cement mortar under freeze-thaw.” *Rock Mech. Rock Eng.* 2020, *53*, 881–907.
62. **Mainali, G.; Dineva, S.; Nordlund, E.** “Experimental study on debonding of shotcrete with acoustic emission during freezing and thawing cycle.” *Cold Reg. Sci. Technol.* 2015, *111*, 1–12.
63. **Huang, S.B.; Liu, Y.Z.; Guo, Y.L.; Zhang, Z.; Cai, Y.** “Strength and failure characteristics of rock-like material containing single crack under freeze-thaw and uniaxial compression.” *Cold Reg. Sci. Technol.* 2019, *162*, 1–10.
64. **Wang, Y.; Yuan, Q.; Deng, D.; Ye, T.; Fang, L.** “Measuring the pore structure of cement asphalt mortar by nuclear magnetic resonance.” *Constr. Build. Mater.* 2017, *137*, 450–458.
65. **Lian, S.L.; Li, J.S.; Gan, F.; Bi, J.; Wang, C.L.; Zheng, K.** “Investigation of the shear mechanical behavior of sandstone with unloading normal stress after freezing-thawing cycles.” *Machines* 2021, *9*, 339.
66. **Pan, W.H.; Sun, X.D.; Wu, L.M.; Yang, K.K.; Tang, N.** “Damage detection of asphalt concrete using piezo-ultrasonic wave technology.” *J. Mater.* 2019, *12*, 443.
67. **Çelik, M.Y.** “Water absorption and P-wave velocity changes during freeze-thaw weathering process of crosscut travertine rocks.” *Environ. Earth. Sci.* 2017, *76*, 409.
68. **Li, X.P.; Qu, D.X.; Luo, Y.; Ma, R.Q.; Xu, K.; Wang, G.** “Damage evolution model of sandstone under coupled chemical solution and freeze-thaw process.” *Cold Reg. Sci. Technol.* 2019, *162*, 88–95
69. **Huang, S.; Liu, Q.; Cheng, A.; Liu, Y.** “A statistical damage constitutive model under freeze-thaw and loading for rock and its engineering application.” *Cold Reg. Sci. Technol.* 2018, *145*, 142–150.
70. **Kang, Y.; Liu, Q.; Huang, S.** “A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for rock mass under freezing/thawing condition.” *Cold Reg. Sci. Technol.* 2013, *95*, 19–26.
71. **Tan, X.; Chen, W.; Yang, J.; Cao, J.J.** “Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles.” *Cold Reg. Sci. Tech.* 2011, *68*, 130–138.
72. **Wu, Q.H.; Yang, Y.; Zhang, K.X.; Li, Q.Y.; Chen, W.; Liu, Z.F.** “Study on the mechanical properties and deterioration mechanism of sandstones under different humidity conditions.” *J. Cent. South. Univ.* 2023, *30*, 4252–4267.
73. **Lu, Y.N.; Li, X.P.; Han, Y.H.; Wu, J.** “Mechanical properties of rock specimens with a single natural weak plane after freeze-thaw action.” *Cold Reg. Sci. Technol.* 2021, *181*, 103179.
74. **Petersen, L.; Lohaus, L.; Polak, M.A.** “Influence of freezing-thawing damage on

behavior of reinforced concrete elements.” *JACI Mater. J.* 2007, 104, 369–378.

75. **Khazaei, C.; Hazzard, J.; Chalaturnyk, R.** “Damage quantification of intact rocks using acoustic emission energies recorded during uniaxial compression test and discrete element modeling.” *J. Comput. Geotech.* 2015, 67, 94–102.

76. **Park, J.; Hyun, C.; Park, H.** „Changes in micro structure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action.” *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2015, 74, 555–565.

77. **Fédération Internationale du Béton (fib No. 34).** „Model Code for Service Life Design.”, 2006. ISBN: 978-2-88394-074-1.

78. **Papadakis, V.G.** „Effect of the Relative Humidity on the Carbonation Rate of Concrete.” Cement and Concrete Research, 1991.

79. **ASRO (2013). SR EN 206: Beton.** „Specificație, performanță, producție și conformitate.” București: Asociația de Standardizare din România.

80. **Bazant, Z.P.; Kaplan, M.F.** „Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models”, 1996.

81. **Powers, T.C.; Helmuth, R.A.** „Theory of Volume Changes Associated with Freezing in Porous Materials”, 1953.

82. **Fagerlund, G.** „Critical Degrees of Saturation at Freezing of Porous Materials”, 1977.

83. **ASRO (2004). SR EN 1992-1-1:2004 – Eurocod 2.** „Proiectarea structurilor din beton. Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri”, București: Asociația de Standardizare din România.