



Ognjen Govedarica¹, Marina Škondrić²
Filip Stanić³, Aleksandar Đukić⁴, Branislava Lekić⁵
Vladana Rajaković-Ognjanović⁶

Pregledni naučni rad
DOI: 10.5937/VIK25223G

PRIRODOM INSPIRISANA REŠENJA U URBANOM ODVODNJAVANJU: MOGUĆNOSTI I IZAZOVI POROZNOG POPLOČANJA

Rezime: Urbane sredine suočavaju se sa sve učestalijim pluvijalnim poplavama usled klimatskih promena i sve većeg udela nepropusnih površina. Tradicionalni sistemi kanalizacije često ne mogu efikasno da prihvate uvećane velike količine atmosferskih otpadnih voda, što dovodi do izlivanja vode u najnižim etažama objekata, zadržavanja vode na terenu i potencijalne kontaminacije prostora. Primena prirodom inspirisanih rešenja, poput poroznih betonskih popločanja, omogućava kontrolisanu infiltraciju i retenziranje atmosferskih voda, smanjujući vršne protoke, zapreminu otekle vode i povećavajući trajnost infrastrukture. Integracija prirodom inspirisanim rešenja i sive infrastrukture vodi ka uvećanom korišćenju recikliranih materijala što održivosti i rezilijentnosti urbanih sredina prema pluvijalnim poplavama.

Cljučne reči: urbanizacija, pluvijalne poplave, porozni beton, zelena infrastruktura, održivo upravljanje vodama

NATURE-BASED SOLUTION IN URBAN DRAINAGE: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF POROUS PAVING

Abstract: Urban areas are increasingly challenged by pluvial flooding, driven by climate change and the expansion of impervious surfaces. Conventional sewer systems often lack the capacity to manage increased volumes of stormwater, resulting in water spills in the lowest floors of buildings, retention of water on the ground and potential contamination. Implementing nature-based solutions, such as porous concrete pavements, supports controlled infiltration and retention of stormwater, thereby reducing peak

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, ogovedarica@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4995-3932

² Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, amarina@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-8911-5028

³ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, fstanic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0271-5993

⁴ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, djukic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3548-989X

⁵ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, branaj@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3360-2118

⁶ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, vladana@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4895-7007

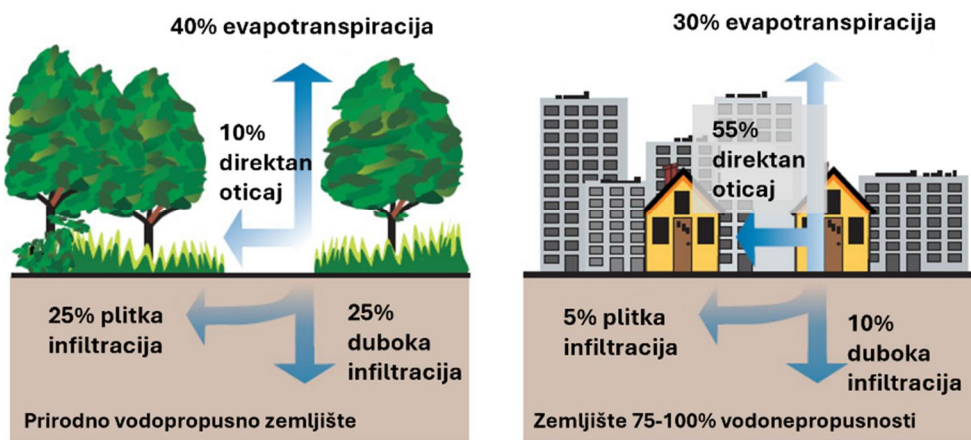


flows, lowering runoff volumes, and improving infrastructure durability. The integration of nature-inspired solutions and gray infrastructure leads to an increased use of recycled materials for the sustainability and resilience of urban environments to flooding.

Key Words: urbanization, pluvial flooding, porous concrete, green infrastructure, sustainable water management

1. Uvod

U prirodnim uslovima priličan deo atmosfere vode ostaje na površini gde je koriste biljke ili isparava (evapotranspiracija), značajan deo infiltrira kroz zemljište prohranjujući podzemne vode ili otiče potpovršinskim tokom dok manji deo otiče površinom prema recipijentima (slika 1 levo). Međutim, ubrzana urbanizacija, podstaknuta intenzivnom migracijom stanovništva iz ruralnih u urbane sredine, rezultirala je naglim smanjenjem zelenih površina koje su zamenjene stambenim, industrijskim i infrastrukturnim objektima. Na taj način veliki deo tla prekriven je vodonepropusnim površinama, poput krovnih pokrivača, asfalta i betona, što značajno smanjuje mogućnost evapotranspiracije i infiltracije (slika 1 desno) [1, 2].



Slika 1. Uticaj urbanizacije na površinski oticaj: pre (levo) i nakon urbanizacije (desno) [3]
Figure 1. Urbanization impact on surface runoff: before (left) and after urbanization (right) [3]

Kao posledica urbanizacije, povećava se koeficijent oticaja, pa se veći deo atmosfere vode zadržava na površini i ubrzano sliva ka kanalizacionoj mreži, čiji kapaciteti sve češće nisu dovoljni da prihvate velike dotoke. To dovodi do akumulacije vode na kolovozima i trotoarima i učestalih pluvijalnih poplava u urbanim sredinama. Problem je posebno izražen tokom intenzivnih kiša, kada se površinski oticaj sa nepropusnih površina višestruko uvećava, uz proporcionalno povećanje brzine oticaja. Time se produžava vreme zadržavanja atmosfere vode u urbanim slivovima u poređenju sa prirodnim uslovima, što uzrokuje plavljenje nižih delova gradskog područja. [4, 5, 6] Povrh toga, u poslednjih nekoliko decenija klimatske promene dovode do sve učestalijih padavina visokog intenziteta i kratkog trajanja, što dodatno utiče na prirodne hidrološke procese.



Ograničenja postojećih konvencionalnih sistema, tzv. „sive infrastrukture“, za odvođenje atmosferskih voda nameću potrebu za primenom prirodom inspirisanih rešenja. Savremeni koncepti upravljanja atmosferskim vodama zasnivaju se na smanjenju pikova protoka i zapremina oticaja retenziranjem i infiltracijom atmosferskih voda, uz istovremeno unapređenje njihovog kvaliteta. Jedno od mogućih rešenja podrazumeva primenu polupropusne galanterije izrađene od poroznih betona, koji omogućavaju delimičnu infiltraciju padavina. Ovi materijali nalaze primenu pri izgradnji pešačkih staza, saobraćajnica manjeg opterećenja i drugih urbanih površina, čime se smanjuje direktan dotok atmosferskih voda u kanalizacione sisteme. [7, 8, 9]

2. Ograničenja konvencionalnih sistema i potreba za novim pristupima

Tradicionalna praksa urbanog odvodnjavanja zasniva se pre svega na kanalisanju i povremenom, delimičnom retenziranju atmosferskih voda. Brza urbanizacija i povećanje udela nepropusnih površina često nisu praćeni adekvatnim razvojem infrastrukture, pa kapaciteti postojećih kanalizacionih sistema često nisu dovoljni da u kratkom vremenu prihvate velike količine atmosferskih optadnih voda, kako po zapremini tako i po vršnim protocima. Posledica su učestale pluvijalne poplave, uključujući plavljenje podruma kod opšteg sistema kanalisanja i zadržavanje vode na površini, sa rizicima po zdravlje ljudi i životnu sredinu. [10]

Atmosferske padavine spiraju akumulirana zagađenja sa urbanih površina, pri čemu u površinskom oticaju mogu biti prisutne masti i ulja, suspendovane materije, teški metali, organski spojevi, pesticidi, soli, patogeni organizmi i druge supstance. Poreklo ovih zagađujućih materija nije isključivo antropogeno jer deo ovih materija potiče od rastvaranja prirodnih supstanci sa zemljišta ili iz atmosfere. Pored prirodnih izvora, značajan doprinos zagađenju daju saobraćaj, industrijska proizvodnja, akcidentni izlivi, te emisije zagađujućih materija u atmosferu koje se talože na urbane površine. Poseban izazov predstavlja činjenica da voda koja se sliva sa vodonepropusnih površina može nositi štetne materije direktno u rečne tokove, potencijalno ugrožavajući biodiverzitet. Upravo zato je primena prirodom inspirisanih rešenja od ključnog značaja jer ona smanjuju oticaj i spiranje zagađenja na mestu njihovog nastanka – deo kišnice se na mestu padavina infiltrira u tlo i/ili zadržava. [11]

Ograničenja postojećih sistema urbanog odvodnjavanja, i u pogledu kvantiteta i u pogledu kvaliteta voda, podstiču interesovanje za prirodom inspirisanim rešenjima, čija primena može ublažiti efekte urbanih poplava. Metode koje doprinose razvoju prirodom inspirisanih rešenja obuhvataju očuvanje i proširenje zelenih površina, koje osim što prirodno regulišu oticanje atmosferskih voda, poboljšavaju kvalitet vazduha, povećavaju biodiverzitet i služe kao prostori za rekreaciju. Neka od prirodom inspirisanih rešenja su [4, 12]:

- Kišne bašte i bioretenzioni vrtovi, sa sistemima filtracije kroz zemljište i vegetaciju, omogućavaju zadržavanje i kontrolisano oticanje vode, dok zeleni krovovi usporavaju i filtriraju padavine koje dospeju na njih.
- Drenažni kanali i burad za prikupljanje kišnice doprinose smanjenju površinskog oticaja, dok veštačke močvare funkcionišu kao prirodni filteri, apsorbujući vodu u zemljište.
- Propusni betoni i asfalti omogućavaju prolazak vode kroz podlogu u drenažni sloj, često u kombinaciji sa cevovodnim sistemima za odvod viška vode.

- Restauracija rečnih korita, vraćanjem krivudavih oblika i raznovrsne vegetacije, povećava kapacitet korita za prihvata atmosferskih voda.

3. Porozna betonska popločanja – mogućnosti primene i izazovi

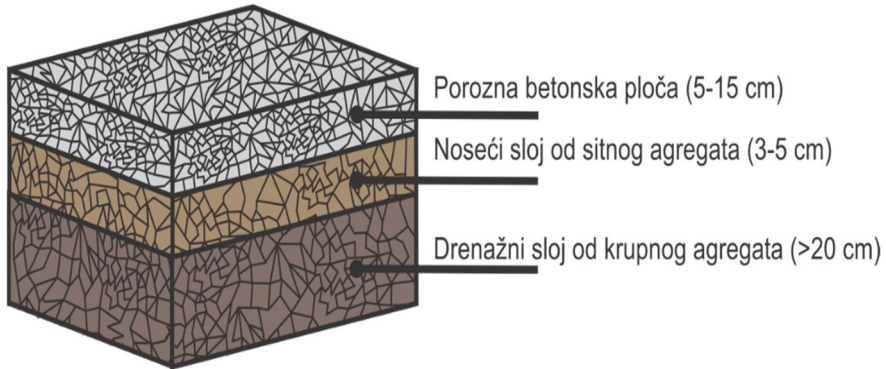
U okviru saobraćajne infrastrukture, primena principa održivog razvoja zahteva transformaciju tradicionalnih, energetski zahtevnih procedura izgradnje u cilju obnavljanja prirodne sposobnosti površina da apsorbiraju kišnicu. Jedno od efikasnih rešenja koje se primenjuje globalno je uvođenje poroznih popločanja u urbanim sredinama. Najčešći tipovi poroznih popločanja su: porozni asfalt, betonske raster ploče, porozni beton i porozne behaton ploče (slika 2). Razlika između ovih proizvoda ogleda se u mehanizmu propustljivosti: neki materijali sadrže pore sposobne da transportuju značajne količine vode, dok su drugi postavljeni tako da kišnica prolazi kroz prostore između elemenata popločavanja [7, 8, 9, 13].



Slika 2. Najčešći tipovi poroznih popločanja
Figure 2. The most common types of porous pavements

Porozni beton se proizvodi od krupnog agregata, vode i veziva, pri čemu izostavljanje finih čestica poput peska omogućava stvaranje većeg procenta krupnih pora. Ovakvi materijali su idealni za pešačke i biciklističke staze, kao i za parkinge, pri čemu opterećenje utiče na debljinu i strukturu ploča. Propusne betonske ploče moraju zadovoljiti dva osnovna, ali suprotstavljena kriterijuma: omogućiti prolaz vode kroz šupljine uz zadržavanje finih čestica, i istovremeno izdržati saobraćajna opterećenja, iako porozna struktura smanjuje njihovu čvrstoću pri pritisku. Preporučeni procenat šupljina kreće se između 15% i 30% kako bi se postigla zadovoljavajuća vodopropusnost i nosivost. Osim poroznosti, na svojstva propusnog betona utiču odnos vode i cementa, svojstva cementne paste, veličina agregata i dodaci u smeši [14].

Za pravilno funkcionisanje poroznih površina, važna je i konstrukcija celokupnog sistema, koja uključuje više slojeva. Porozna betonska ploča, izložena je spoljnim uslovima, treba da ima dovoljnu nosivost i trajnost, sa debljinom obično od 5 do 15 cm i poroznošću 15–25%. Ispod njega izvodi se nevezani noseći sloj od agregata manje krupnoće (4/8 mm) debljine 3–5 cm, a potom sloj krupnijeg agregata (npr. 31.5/63 mm) koji služi kao drenažni sloj sa poroznošću 20–40% i debljinom preko 20 cm (slika 3). Nevezani sloj se obično odvaja geotekstilnom membranom kako bi se sprečio transport sitnih čestica. Za staze sa manjim opterećenjem debljina slojeva može biti manja [15].



Slika 3. Presek sistema poroznog popločanja

Figure 3. Porous pavement cross-section

Prečnik pora u propusnom betonu treba da bude između 2 i 8 mm, a struktura uključuje tri vrste pora: zatvorene, otvorene i povezane. Otvorene pore omogućavaju prodor vode unutar betona i utiču na čvrstoću, dok povezane pore omogućavaju drenažu. Ukupna poroznost obično uključuje 10–20% zatvorenih i 80–90% efektivnih pora. Broj, oblik i veličina pora direktno utiču na disipaciju energije pod opterećenjem – veće pore povećavaju koncentraciju napona i smanjuju žilavost, pa je važno odabrati odgovarajuću cementnu pastu i agregat kako bi propusni beton ispunio svoju osnovnu funkciju [16].

Usvajanje i primena principa cirkularne ekonomije, kroz korišćenje otpadnih i recikliranih materijala u građevinarstvu, jedna je od aktuelnih tema u naučnim istraživanjima u oblasti građevinskih materijala i održive izgradnje [17]. Širok spektar industrijskih nusproizvoda moguće je upotrebiti za proizvodnju građevinskih materijala, između ostalog i poroznih betonskih ploča.

Delimična zamena cementa i prirodnog agregata, čak i u manjim procentima, doprinosi značajnom smanjenju efekata staklene bašte, očuvanju prirodnih resursa i podstiče održivi razvoj. Delimična zamena cementa nekim od otpadnih materijala (eng. Supplementary cementitious materials, SCM), koji najčešće završavaju na deponiji, pruža višestruke koristi ukoliko se implementira na način koji ne utiče značajno na ključna svojstva finalnog proizvoda [18].

Iako porozni betoni i propusne podloge pružaju značajne prednosti u infiltraciji atmosferskih voda i smanjenju površinskog oticaja, njihova primena ima i određene izazove. Smanjena čvrstoća u odnosu na konvencionalni beton može ograničiti upotrebu u oblastima sa velikim saobraćajnim opterećenjem, dok dugoročna funkcionalnost zavisi od redovnog održavanja, jer pore mogu biti začepjene sedimentima, lišćem ili drugim česticama.

Klimatski ekstremi, poput smrzavanja, odmrzavanja i velikih količina padavina, mogu dodatno uticati na trajnost i efikasnost ovih površina. Takođe, početni troškovi izgradnje i kompleksnost instalacije često su veći nego kod standardnih betonskih ili asfaltnih površina, što zahteva pažljivo planiranje i optimizaciju dizajna kako bi se ostvarila dugoročna održivost i funkcionalnost sistema [6, 15, 19, 20].



4. Zaključak

Urbanizacija i klimatske promene dovode do sve učestalijih pluvijalnih poplava u gradskim sredinama, prvenstveno zbog smanjene evapotranspiracije i infiltracije atmosferskih voda i povećanog površinskog oticaja sa vodonepropusnih površina.

Tradicionalni sistemi kanalizacije često nisu u stanju da prihvate velike količine padavina u kratkom vremenu, što izaziva akumulaciju vode na površinama i transport zagađujućih materija u recipijente. U tom kontekstu, prirodom inspirisana rešenja i zelena infrastruktura postaju ključni pristupi za ublažavanje negativnih efekata urbanih poplava, kroz zadržavanje, filtraciju i kontrolisano oticanje atmosferskih voda.

Porozne betonske i asfaltne podloge, uz pravilnu konstrukciju slojeva, kontrolisanu poroznost i izbor agregata, omogućavaju efikasnu apsorpciju kišnice, smanjenje vršnih protoka i očuvanje nosivosti površina. Integracija ovih rešenja sa drugim elementima zelene infrastrukture, poput kišnih bašta, bioretenzionih vrtova i drenažnih sistema, dodatno poboljšava kapacitet gradskih slivova za prihvatanje atmosferskih voda.

Primena recikliranih i otpadnih materijala u izradi poroznih podloga doprinosi održivosti, smanjenju emisije CO₂ i očuvanju prirodnih resursa, čineći ih ključnim elementom u razvoju ekološki otpornijih i održivijih urbanih sredina.

Zahvalnica

Ovo istraživanje finansirano je od strane UNDP programa „EU za Zelenu agendu u Srbiji – Cirkularna ekonomija za efikasno korišćenje resursa i industrijsku simbiozu“, kroz projekat „Zero-waste porozne površine kao alternativa za gradove otporne na poplave“ (ID: 00139323/00129089/2023/3); Fonda za inovacionu delatnost Republike Srbije, u okviru Programa saradničkih grantova, kroz projekat „ECO FLOW prefabrikovani porozni betonski elementi“ (ID: 52553)

5. Literatura

- [1] Blenkinsop S, Muniz L, Smith A. J. P. Climate Change Increases Extreme Rainfall and the Chance of Floods. *ScienceBrief Review* in: Critical Issues in Climate Change Science, edited by: C. Le Quéré, P. Liss & P. Forster, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4779119>, 2021.
- [2] Winston R. J, Arend K, Dorsey J. D. and Hunt W.F. *Water Quality Performance of a Permeable Pavement and Stormwater*, 2020.
- [3] Sullivan S, Bowers R. *Low-Impact Development: Concrete Options for Porous Pavements*. Construction Canada. 2013.
- [4] Deletic, A, Qu, J, Bach P. M, Liu, G., Wang, A., & Zhang, K. *The multi-faceted nature of Blue-Green Systems coming to light*. *Blue-Green Systems*, 2(1), 186–187. <https://doi.org/10.2166/BGS.2020.002>, 2020
- [5] Kissler J, Wirth M, de Gussem B, van Eekert M, Zeeman G, Schoenborn A, Vinnerås B, Finger D. C, Repinc S. K, Bulc T. G, Bani A, Pavlova D, Staicu L. C, Atasoy M, Cetecioglu Z, Kokko M, Haznedaroglu B. Z, Hansen J, Istenič D, ... Beesley, L. *A review of nature-based solutions for resource recovery in cities*. *Blue-Green Systems*, 2(1), 138–172. <https://doi.org/10.2166/BGS.2020.930>, 2020.



- [6] O'Donnell E, Thorne C, Ahilan S, Arthur S, Birkinshaw S, Butler D, Dawson D, Everett G, Fenner, R, Glenis V, Kapetas L, Kilsby C, Krivtsov V, Lamond J, Maskrey S, O'Donnell G, Potter K, Vercruyse K, Vilcan T. & Wright, N. The blue-green path to urban flood resilience. *Blue-Green Systems*, 2(1), 28–45. <https://doi.org/10.2166/BGS.2019.199/868261/BGS2019199.PDF>, 2020.
- [7] Debnath, B., & Sarkar, P. P. (2018). Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(12), 1516–1531. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554217>
- [8] Antunes L. N, Ghisi E. & Severis R. M. Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building. *Science of The Total Environment*, 746, 141087. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141087>, 2020.
- [9] Guan X, Wang J. & Xiao F. Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127022. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127022>, 2021.
- [10] Đukić A, Lekić B, Babić B, Govedarica O. & Rajaković-Ognjanović V. Prirodom inspirisana rešenja infrastrukture urbanog odvodnjavanja – Mogućnosti primene i ograničenja. *Voda i sanitarna tehnika*, LII(4), 15-24, 2024..
- [11] Djukić A, Lekić B, Rajaković-Ognjanović V, Naunović Z, Prodanović D. Build-up and characterisation of pollutants on urban impervious surfaces, *Water Science & Technology*, Vol. 77.8, 2123-2133. doi: 10.2166/wst.2018.128, 2018.
- [12] Holm A, Holm, K. E., Shelton, D. P., Rodie, S. N., Feehan, K. A. & Franti, T. G. Stormwater Mangement: What Stormwater Management Is and Why It Is Important. University of Nebraska, Lincoln, „Report on Pervious Concrete,“ American Concrete Institution, 2014.
- [13] Sprouse C. E, Hoover C, Obritsch O. & Thomazin H. Advancing Pervious Pavements through Nomenclature, Standards, and Holistic Green Design. *Sustainability 2020*, Vol. 12, Page 7422, 12(18), 7422. <https://doi.org/10.3390/SU12187422>, 2020.
- [14] Muttuvelu D. V, Wyke S. & Vollertsen J. Are Permeable Pavements a Sustainable Solution? A Qualitative Study of the Usage of Permeable Pavements. *Sustainability 2022*, Vol. 14, Page 12432, 14(19), 12432. <https://doi.org/10.3390/SU141912432>, 2022
- [15] Ramadhansyah P. J, Mohd Ibrahim M. Y, Mohd Rosli H, Mohd Haziman W. I. A Review of Porous Concrete Pavement: Applications and Engineering Properties, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 554, 2014.
- [16] Sprouse E. C. III, Hoover C, Obritsch O, Thomazin H. Advancing Pervious Pavements through Nomenclature, Standards and Holistic Green Design, MDPI, *Journals/Sustainability*, Volume 12, 2020 Issue 18, 10.3390/ su12187422, 2020.
- [17] Ahmed T, Hoque S. Study on pervious concrete pavement mix designs, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 476, 012062, doi:10.1088/1755-1315/476/1/012062, 2020.
- [18] Harber P. *Applicability of No-Fines Concrete as a Road Pavement*, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2015.
- [19] Nodehi M. & Taghvaei V. M. Applying Circular Economy to Construction Industry through Use of Waste Materials: A Review of Supplementary Cementitious Materials, Plastics, and Ceramics. *Circular Economy and Sustainability 2022* 2:3, 2(3), 987–1020. <https://doi.org/10.1007/S43615-022-00149-X>, 2022.



- [20] Khankhaje E, Kim T, Jang H, Kim C. S, Kim J. & Rafeizonooz M. Properties of pervious concrete incorporating fly ash as partial replacement of cement: A review. *Developments in the Built Environment*, 14, 100130. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2023.100130>, 2023.
- [21] Singh A, Sampath P. V. & Biligiri K. P. (2020). A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. *Construction and Building Materials*, 261, 120491. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120491>, 2020.