

PRIMENA INSTRUMENTALNIH METODA ZA ISPITIVANJE SVOJSTAVA I MIKROSTRUKTURE KONSTRUKCIONIH BETONA

APPLICATION OF INSTRUMENTAL METHODS IN THE INVESTIGATION OF PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF CONSTRUCTION CONCRETES

Anja Terzić¹, Tatjana Volkov-Husović², Radmila Jančić-Heineman², Ljubica Pavlović¹

¹Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, Srbija

²Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Rezime

U radu je dat pregled instrumentalnih metoda koje se najčešće koriste u ispitivanju mikrostrukture, faznog sastava i intergranularnog prostora konstrukcionih betona. Mikrostrukturu betona, kao kompozitnog materijala, čine vezivo i zrna agregata definisanih veličina i za ispitivanja se mogu primeniti: mikroskopija (SEM i optički mikroskop) i metoda kompjuterske analize slike - Image Pro Plus. Fazni sastav betona i pojedina svojstva mogu se odrediti pomoću X-ray difrakcije (rendgena), diferencijalno termijske analize - DTA, termogravimetrijske analize - TGA i dilatometrijske metode. Prikaz metoda izvršen je na uzorcima betona sa punilom na bazi recikliranih šamotnih opeka.

Ključne reči: beton, mikrostruktura, SEM, X-ray, Image Pro Plus, DTA, TGA

Abstract

Methods for the investigation of microstructure of construction concretes are presented in this paper. Concrete is a composite material, thus its microstructure consists of bonding agent (cement) and aggregate with predefined grain sizes. Microstructure can be investigated with methods such are: scanning electron microscopy (SEM) and Image Pro Plus – PC program for image analysis. Phase content and certain properties can be investigated using X-ray diffraction, DTA, TGA and dilatometer. Methods are described using sample of concrete with recycled chamotte filler.

Key words: concrete, microstructure, SEM, X-ray, Image Pro Plus, DTA, TGA

1. Uvod

Beton se smatra kompozitom dva ili više različitih polaznih materijala koji imaju međusobno različita svojstva i koji spajanjem daju sasvim nov proizvod sa drugačijim karakteristikama od polaznih. Smisao kompozitnih materijala je u dobijanju bolje strukture finalnog proizvoda i poboljšanih mehaničkih, hemijskih ili drugih svojstava. Treba napomenuti da se polazne komponente ne mešaju ni ne rastvaraju, pa se zato u kompozitnom materijalu jasno razlikuju dve ili više faza. Jedna od faza se uvek smatra „ojačivačem“ (punilo, agregat) – ona daje jačinu i tvrdoću, a druga je „matrica“ ili „vezivo“ i ona okružuje i drži zajedno grupe fragmenata ojačivača.

Agregat ili punilo je polazna sirovina koja proizvodu obezbeđuje čvrstoću. On treba da bude otporan u uslovima delovanja ekstremno visokih i niskih temperatura, kao i u agresivnim sredinama i da pri tome ne stvara sa vezivom nepoželjne faze koje bi štetele mehaničkim i drugim svojstvima kompozita. Granulometrijski sastav punila treba da bude takav da izgrađuje jak skelet sačinjen od zrna unutar stukture betona i da se obezbedi najbolje moguće pakovanje zrna betonske mešavine (maksimalna gustina i minimalna poroznost kompozita).

Vezivno sredstvo je disperzni sistem koji se sastoji iz disperzne faze – materijala krupnoće ~ 0,09 mm (najčešće cementa) i disperzne sredine – vode. Veziva mogu biti: hidraulična, polimerizaciona, koagulaciona, organske smole, dekstrin, itd. Izbor vrste veziva određuje se na osnovu: postojanosti zapremine neoblikovanog materijala (betona) i zahtevane čvrstoće.

Struktura građevinskih betona i njihov fazni sastav formiraju se neposredno nakon ugrađivanja i u toku 28-og dnevnog očvršćavanja. Nakon tog perioda oni se vrlo malo menjaju. Danas postoje savremene metode za ispitivanje i analizu faznog sastava i formirane mikrostrukture betona.

2. Instrumentalne metode za identifikaciju faznog sastava i mikrostrukture konstrukcionih betona

Metode za ispitivanje faznog sastava, strukture betona i veličine čestica su prikazane na primeru betona na bazi reciklirane šamotne opeke kao punila (agregata).

2.1. Metode za ispitivanje faznog sastava i strukture betona

Metode za ispitivanje faznog sastava i strukture materijala se mogu podeliti na: metode termijske analize, metode rendgenske difrakcione analize i metode mikroskopske analize. U slučaju betona najzastupljenije su diferencijalno termijska analiza (DTA), termogravimetrijska analiza (TGA), dilatometrijska analiza i rendgenske difrakcione analize (X-ray metoda).

2.1.1. Diferencijalno termijska analiza – DTA

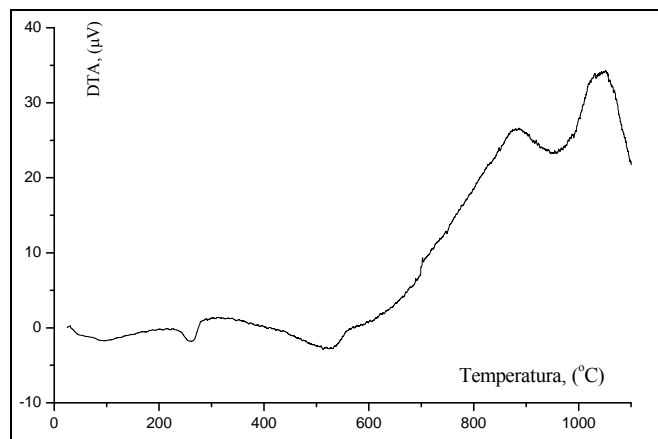
Metode termijske analize ispituju promenu nekog fizičkog parametara sistema u funkciji temperature. Postoji više metoda termijske analize koje se razlikuju u zavisnosti od fizičkog parametra koji se određuje, a u slučaju betona najzastupljenija je diferencijalno termijska analiza (DTA). Ova metoda obično služi za početnu karakterizaciju komponenata, ili karakterizaciju sprasenog kompozita, zatim za izučavanje kinetike procesa koji se dešavaju u toku vezivanja i očvršćavanja betona i za izučavanje mineraloškog sastava.

DTA se zasniva na upoređivanju termičkih svojstava ispitivanog uzorka i termički inernog materijala (etalona). Aparat (prikazan na Slici 1.) registruje razliku temperature između ispitivanog uzorka i referentnog materijala u toku zagrevanja ili hlađenja konstantnom brzinom, pri istim ostalim uslovima. Pojava razlike temperature je posledica odvijanja nekog procesa u uzorku (kristalizacije, isparavanja, adsorpcije, dehidratacije, razlaganja, itd.). Reakcije su praćene ili oslobođanjem ili absorbovanjem toplote, a samim tim se na dijagramu prepoznaju egzotermni odnosno endotermni pikovi.



Slika 1. Izgled uređaja za DTA
Figure 1. Testing equipment for DTA

Mogućnost korišćenja DTA za identifikaciju i praćenje promena faznog sastava u toku zagrevanja se zasniva na činjenici da svakoj promeni u materijalu odgovara toplotni efekat koji se beleži na termogramu i da su svi toplotni efekti karakteristični za konkretni ispitivani materijal. Svaka ispitivana supstanca ima svoju diferencijalno termijsku krivu sa endoternim i egzoternim pikovima. Za njenu analizu koriste se metode upoređivanja sa odgovarajućim standardima koji se nalaze u katalozima DTA krivih. DTA se može koristiti i za kvantitativna ispitivanja, što zahteva precizno određivanje površine pikova. DTA difraktogram dat je na Slici 2.



Slika 2. DTA difraktogram betona na bazi reciklirane šamotne opeke
Figure 2. DTA diagram for concrete based on recycled shamote

2.1.2. Termogravimetrijska analiza - TGA

Termogravimetrijska analiza (TGA) se bazira na principu registrovanja promene mase uzorka u toku zagrevanja ili hlađenja uzorka. Temperature na kojima se odigravaju ti procesi su karakteristične za pojedine minerale i služe za njihovu identifikaciju i utvrđivanje njihovog prisustva u uzorku. Istovremeno, TGA se koristi i za kvantitativna ispitivanja, s obzirom na činjenicu da je promena mase direktno proporcionalna količini prisutnog minerala u ispitivanoj komponenti.

TGA i DTA su komplementarne metode i podaci dobijeni jednom tehnikom potvrđuju rezultate druge. DTA, ipak, ima širi opseg primene u odnosu na TG određivanja. Naime, TGA ne registruje promene u materijalu u kojima ne dolazi do promena mase, recimo, promene pri reakcijama u čvrstom stanju. Iz TGA, na osnovu izmerenih promena mase u funkciji vremena, mogu se odrediti važni podaci kao što su: stabilnost na temperaturne promene, temperatura razlaganja, oksidaciona stabilnost, sadržaj vlage, itd.

Postupak ispitivanja uzorka klasičnom TGA sastoji se u sledećem (uređaj na Slici 3.): sprušeni uzorak se stavi u tigl od platine ili elektrotopljenog korunda, koji je platinskom žicom vezan za jedan krak analitičke vage. Tigl se stavi u radni prostor peći i zagreva brzinom od 10°C/min. Svaka promena mase uzorka manifestuje se izbacivanjem vage iz ravnotežnog položaja, što se direktno registruje. Kod TGA, kao i kod DTA, metodom upoređivanja dobijenih krivih sa kalibracionim krivama se dobija slika o vrsti i sadržaju odgovarajućih minerala u uzorku koji se ispituje.



Slika 3. Izgled uređaja za TGA
Figure 3. Testing equipment for TGA

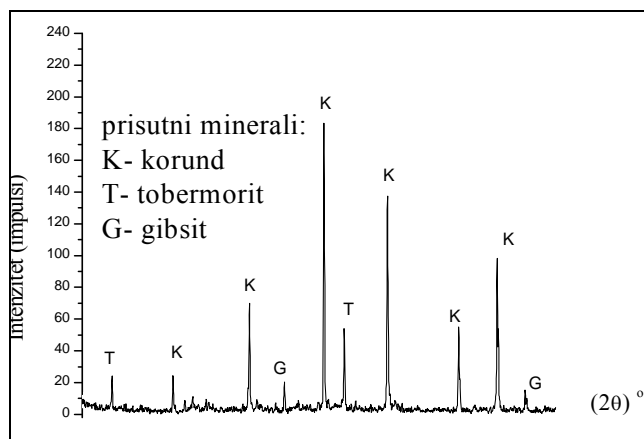
TGA nalazi primenu u proučavanju procesa koji se odigravaju pri vezivanju i očvršćavanju cementa, a time je značajna i za materijale na bazi cementa – betone. Brzina procesa vezivanja i očvršćavanja cementa se može pratiti preko količine vode koju hemijski vezuju minerali cementa (alit, belit, celit, braunmillerit) pri hidrataciji. Ako se pri tome zna sastav hidrata i sadržaj hidratne vode, tada količina vezane vode može poslužiti i kao kvantitativni pokazatelj stepena hidratacije veziva. Ispitivanja su pokazala da brže vezivanje vode od strane veziva izaziva njegovu bržu hidrataciju. Proces hidratacije veziva je praćen skupljanjem, zgušnjavanjem i prelaskom testa u čvrsto stanje (dakle, promenom mase). Brzina procesa se može pratiti na osnovu porasta jačine veze u sistemu i na osnovu razlika u temperaturi razlaganja. Rezultati TGA daju posredno podatke o brzini, stepenu hidratacije cementa i brzini njegovog očvršćavanja i od značaja su za tehnologiju i osobine betona.

2.1.3. Rendgenska difrakciona analiza – X-ray

Rendgenska analiza je metoda za identifikaciju minerala i mineraloškog sastava materijala i ona može biti i kvalitativna i kvantitativna. Pored toga, može se odrediti vrste kristalne rešetke, prisustvo pojedinih faza u sistemu, deformacija kristalne rešetke, veličine kristala, itd. Rendgenska analiza se zasniva na dva svojstva rendgenskih zraka: moći prodiranja kroz kristalnu rešetku i sposobnosti difrakcije od strukturalnih jedinica kristala (atomi, joni, molekuli).

Poznavanje mineraloškog sastava materijala je značajno jer vrsta minerala direktno određuje osobine konačnog proizvoda i mogućnost njegove primene. Značaj rendgenske analize je i u njenoj brzini, tako da se u industrijskim uslovima može pravovremeno reagovati i izvršiti određena korekcija mase u cilju dobijanja definisanog mineraloškog sastava i osobina mase. To je posebno značajno u proizvodnji konstrukcionog i građevinskog materijala.

Za svaki ispitivani materijal (komponentu vatrostalnog betona) dobija se karakterističan difraktogram (Slika 4.). Upoređivanjem difrakcione slike ispitivanog materijala sa katalogom snimljenih uzoraka (ASTM kartice) vrši se identifikacija nepoznatih materijala. Ne postoji mogućnost da više supstanci imaju u potpunosti isti difraktogram. Kod analize mešavina nekoliko kristalnih supstanci (betonska mešavina) dobija se složeni difraktogram i njegova analiza je kompleksnija, ali identifikacija se izvodi na isti, prethodno opisani, način.



Slika 4. X-ray betona na bazi reciklirane šamotne opeke
Figure 4 X-ray for concrete based on recycled shamote

2.1.4. Dilatometrijska analiza

Dilatometrijska analiza podrazumeva registrovanje promene dužine ili zapremine ispitivanog uzorka materijala u funkciji od promene temperature. Te promene mogu biti pozitivne ili negativne, što zavisi od strukturnih karakteristika materijala koji se ispituje. Vrednosti dilatometrijske analize se predstavljaju preko srednjeg linearnog koeficijenta termičkog širenja α ili zapreminskog koeficijenta termičkog širenja β . Dilatometrijska ispitivanja pružaju važne podatke o vrsti i karakteristikama ispitivanog materijala.

Princip rada dilatometra se sastoji u tome da se meri razlika širenja probnog tela i standarda u zavisnosti od temperature. Dilatometar se sastoji se od električne peći, kvarcne cevi koja nosi uzorak, potiskivača koji prenosi promene dimenzija ispitivanog uzorka, a koje se, dalje, preko opruge i ispravljča prenose u registrujući deo (Slika 5.). Temperatura uzorka se meri preko termoelementa čiji se vrh nalazi direktno na uzorku. Ceo sistem se zagreva pomoću peći sa programiranom brzinom zagrevanja, koja obično iznosi 5°C/min. Najsavremeniji i najprecizniji tip dilatometra je laserski dilatometar.

Za snimanje dilatometrijske krive obično se koristi uzorak dužine 50 mm i širine 2 - 10 mm, koji se stavlja u ležište noseće cevi, tako da je sa jedne strane naslonjen na potiskivač koji prenosi promene dimenzije uzorka u toku zagrevanja u registrujući deo.

Prema metodi merenja razlikuju se (1) apsolutno merenje - meri se samo širenje uzorka i (2) diferencijalno merenje - meri se razlika širenja uzorka i referentnog tela. Iz praktičnih razloga korisno je snimiti i krive zagrevanja i krive hlađenja materijala. Uz to je neophodno poznavati stvarne krive dilatacije materijala od kojeg je napravljen potiskivač i oslonac uzorka, da bi se mogle korigovati nađene vrednosti i da bi se dobio krajnji tačan rezultat. Analizom dilatometrijskih krivih može se odrediti: koeficijent termičkog širenja, približan mineraloški sastav, karakteristične veličine vezane za proces sinterovanja, bubrenje pečenih uzoraka pod uticajem vlage, postojanost na temperaturne promene, naknadno širenje vatrostalnih materijala na temperaturi primene, itd. Dilatometrijska ispitivnja mogu, takođe, poslužiti za približno određivanje mineraloškog sastava. Za analizu dobijenih krivih potrebno je posedovanje test krive i mineraloški čistih komponenti radi poređenja.



Slika 5. Slika kvarcnog dilatometra
Figure 5. Quartz dilatometer testing equipment

3.1. Metode za ispitivanje mikrostrukture betona

Mikroskopske metode ispitivanja materijala omogućavaju određivanje parametara vezanih za strukturu, teksturu, morfologiju, i sl. Ovi parametri omogućavaju procenu ponašanja materijala u uslovima primene. Mikroskopska ispitivanja mogu dati i kvantitativne odnose u mikrostrukтури materijala.

3.1.1. Optička mikroskopija

Optički mikroskop (Slika 6.) svojom funkcionalnošću omogućava kvalitativnu identifikaciju minerala, određivanja oblika i veličine čestica čije su dimenzije oko 0,01 mm. Uvećanje koje se postiže optičkim mikroskopom je maksimalno 1000 puta.



Slika 6. Izgled optičkog mikroskopa
Figure 6. Optical microscope

Objektiv mikroskopa se direktno usmerava ka uzorku materijala i pri tome stvara realnu, uvećanu i okrenutu sliku. Obavezno mora biti naznačena veličina koja označava vrednost uvećanja. Za merenje dimenzije čestica koristi se končanica od dve ukrštene linije sa podeocima ili mrežica smeštena ispod okulara. Savremeni mikroskopi, kao sastavni deo poseduju integrator za određivanje dimenzija čestica i za kvantitativna izračunavanja.

U slučaju krupnozrnih materijala (betona) optički mikroskop predstavlja jednostavnu i efikasnu metodu za identifikaciju strukture (pore, zrna, uključci, itd.), slika 7.



Slika 7. Snimak betona na bazi reciklirane šamotne opeke na optičkom mikroskopu
Figure 7. Micrograph of concrete based on recycled shamote obtained using the optical microscope

3.1.2. Mikroskopska analiza skening elektronskim mikroskopom

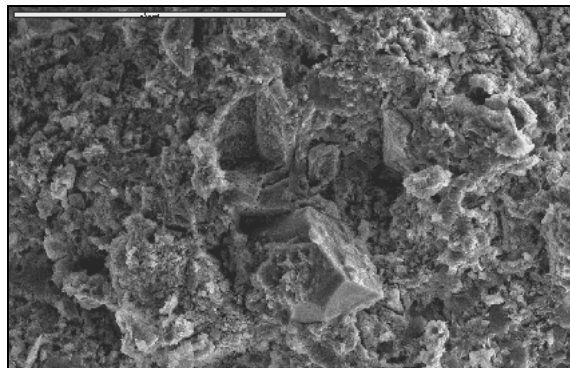
Skening elektronski mikroskop (Slika 8.) ima mogućnost analize vrlo sitnih i finih detalja u strukturi materijala. Na taj način se može ustanoviti identitet prisutnih faza, njihova orijentacija, nehomogenost i defekti strukture materijala. Savremeni elektronski mikroskopi dostižu uvećanje od oko 300000 puta.

Kod skening elektronske mikroskopije (SEM) osnovne informacije su morfološke, a takođe se mogu dobiti informacije o elementarnom hemijskom sastavu (EDS analiza – zasniva se na karakterističnim eksitacijama talasnih dužina elemenata koji se nalaze unutar datog uzorka). SEM pruža značajne prednosti u odnosu na konvencionalne tehnike i karkteriše ga relativno laka priprema uzorka i mogućnost neposrednog posmatranja strukture uzorka u tri dimenzije.



Slika 8. SEM mikroskop
Figure 8. Photograph od SEM

SEM tehnika ne nameće restrikciju veličine uzorka, osim one koja je određena veličinom komore. Uzorci se nparavaju slojem različitog materijala: ugljenik, legura zlato-paladijum, volfram, bakar, aluminijum, itd, radi poboljšavanja kontrasta na samom uzorku. Elektronski top sa vrha kolone SEM-a fokusira se na uzorak i skenira na ramu iza uzorka. U uzorku nastaju „sekundarni elektroni“ (nastali izbacivanjem elektrona iz atoma snopom) koji se detektuju. Postoji zavisnost između osvetljenosti detalja na slici i broja sekundarnih elektrona u tačkama uzorka. Snimanje slike (Slika 9.) kod savremenih SEM-a vrši se u digitalnoj formi na PC računarima. Slike generaisane sekundarnim elektronima predstavljaju prikaz morfoloških karakteristike uzorka. Na slikama se može uočiti struktura sa porama i kanalićima različite veličine i oblika, veličine osnovnih čestica, načina njihovog međusobnog povezivanja, oblik, itd.



Slika 9. SEM snimak betona na bazi reciklirane šamotne opeke
Figure 9. SEM micrograph for concrete based on recycled shamoite

3. Analiza slike

Cilj analize slike jeste da pruži kvantitativni opis slike (broj ćelija određene veličine) ili prepoznavanje oblika, što je korisno ako su morfološke karakteristike objekta povezane sa njegovim svojstvima. Analiza slike nalazi primenu u mnogim oblastima: nauci o materijalima, medicini, robotici, geologiji [15].

Kvantitativni analizatori slike sastoje se od kamere koja može biti televizijska ili foto kamera kombinovana sa optičkim ili elektronskim mikroskopom. Signali koje dobija kamera tretiraju se u centralnoj jedinici koja računa površine, obavlja brojanje i raspodeljuje čestice u klase po veličini prečnika.

Zona koja se ispituje vizualizuje se korišćenjem ekrana, a sistem omogućava izbor ispitivane zone. Sa ovakvim uređajem moguće je odabrati objekte koji se ispituju, kao i razdvojiti, brisati ili spojiti susedne čestice. Ovakvi sistemi omogućavaju korekciju slika ili korišćenje metoda za klasifikaciju kao što je intenzifikacija slike preko određivanja nivoa sivoće da bi se dobio što bolji kontrast.

Samo verovanje da mašine mogu obraditi podatke na sličan ili ekvivalentan način kao ljudski vizuelni sistem je dovelo do niza otvorenih problema. U skorije vreme, istraživački radovi o analizi slike su u vezi sa rezolucijom, dekodiranjem strukture i segmentacijom.

3.1. Kompjuterska analiza slike

Kompjuteri su nezamenljivi kada je reč o obradi velikog broja podataka, o kompleksnim proračunima, pronalaženju određenog broja informacija. S druge strane, ljudski vizuelni sistem je odličan aparat za analizu slike, pogotovu za detalje, kao i za neke druge oblasti u kojima se čovek još uvek ne može zameniti kompjuterima. Iz tog razloga, mnogi alati za analizu slike ispirisani su ljudskim modelima vizuelne percepcije.

Komjuterska analiza slike, kao deo nauke o komjuterima potiče iz 50-ih godina prošloga veka u okviru robotike i izučavanja veštačke inteligencije. To je kvantitativna ili kvalitativna karakterizacija dvodimenzionalne ili trodimenzionalne¹ digitalne slike.

Primena digitane analize slike je veoma široka, i ona obuhvata: medicinu, mikroskopiju, astronomiju, nauke o materijalima, robotiku, metalografiju i mnoge druge.

Digitalna slika

Digitalna slika je predstavljanje dvodimenzionalne slike kao binarnu sliku, pomoću nula i jedinica. U zavisnosti da li postoji određena rezolucija slike, može biti vektorskog ili raster tipa². Digitalne slike imaju konačan broj numeričkih vrednosti koji se nazivaju elementi slike, odnosno pikseli. Digitalna slika se sastoji od unapred određenog broja redova i kolona piksela. Mogu se dobiti različitim uređajima i tehnikama, digitalnim kamerama, skenerima, radarima, seizmografskim aparatima i slično. Takođe, mogu se dobiti pomoću matematičkih formula ili 3D geometrijskih modela, što se izučava u kompjuterskoj grafici [16].

Svaki piksel digitalne slike je povezan sa određenom pozicijom u 2D polju i ima jednu ili više vrednosti koje određuju to polje. Na osnovu broja i prirode tih vrednosti digitalne slike se mogu podeliti na: binarne, u sivoj skali, u boji, u višespektralne itd.

Formiranje digitane slike ili akvizicija je stvaranje slike, uglavnom na osnovu fizičkog objekta. Pod ovim terminom se podrazumevaju dobijanje slike, kompresija, čuvanje, štampanje i prikaz takve slike.

Digitalna slika se može napraviti direktno, od fizičkog objekta, pomoću kamere ili sličnog aparata. Isto tako, može se dobiti sa druge slike dobijene pomoću fotografije, fotografskog filma, sa papira, skenerom ili na neki drugi način. Na kraju, može se dobiti na osnovu geometrijskog modela ili matematičke formule (ovo se više odnosi na kompjutersku sintezu slike).

Prikaz slike

Različiti programi se koriste kako bi se videla slika koja može biti u JPEG (engl. *joint photographic experts group*), TIFF (engl. *tagged image file format*), GIF (engl. *graphics interchange format*) ili PNG (engl. *portable network graphics*) formatu.

Jedan bit je najmanja veličina koju računar može koristiti, kao što jedna sijalica može biti uključena ili isključena. Za sliku od jednog bita koristi se termin monohromatska, koji podrazumeva sliku u sivoj skali ili crno-belu sliku. Tako dobijamo sledeće odnose bita i slike date u tabeli 1.

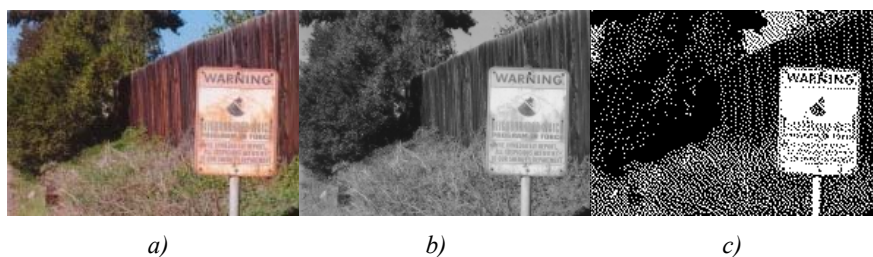
Na slici 10. ista slika prikazana je na tri različita načina. Prva sa leve strane je originalna fotografija u boji, slika u sredini je sivoj skali, a slika s desna je crno-bela, odnosno binarna.

¹ Primenjuje se u medicini.

² Termin digitalna slika se najčešće odnosi na ovaj tip.

Tabela 1. Vrste digitalnih slika prema broju bita koji sadrže
 Table 1. Types of digital images based on number of bits

Broj bita	Vrsta slike
1 bit	monohromatska
8 bita	siva skala
8 bita	u boji
16 bita	više boja
24 bita	originane boje
30/36/48	duboke boje



Slika 10. Ista slika prikazana na tri načina: a) slika u boji, b) slika u nijansama sivog, c) crno-bela slika, binarna

Figure 10. Same image presented as a) colour image, b) grey scale image, c) binary image

Binarne slike

Binarne slike su slike čiji pikseli imaju dve moguće vrednosti intenziteta. Uglavnom su prikazane kao crna i bela. Numerički, ove dve vrednosti su za crnu najčešće 0, a za belu 1 ili 255.

Binarna slika nastaje kada biramo piksele sa vrednostima koje su im dodeljene da bismo sliku u boji ili sivoj skali preneli u binarnu sliku u cilju odvojanja objekata na slici od pozadine. Boja objekta, najčešće bela, predstavlja prednji plan, istaknuto mesto. Ostatak slike, crne boje, predstavlja pozadinu. Međutim, u zavisnosti od slike, ova polarnost može biti obrnuta, u tom slučaju predmeti su predstavljeni 0 a pozadina vrednošću različitom od 0.

Strukture binarne slike mogu se proučavati sa dva aspekta: morfološkog i stereološkog. Morfologija je kvantitativna analiza slike jednog objekta ili jedne strukture i ona daje veličine koje se mogu meriti. Stereologija je skup matematičkih metoda koji omogućava prelazak sa dvodimenzionalne analize preseka na trodimenzionalnu analizu.

Slike u sivoj skali

Razlog dobijanja slike u sivoj skali iz bilo koje slike u boji je što je potrebno manje informacija za svaki piksel. Siva boje je ona u kojoj su sve tri osnovne boje istog intenziteta, tako da je potrebno specificirati jednu vrednost intenziteta za svaki piksel, dok je kod slike u boji potrebno tri intenziteta za svaki piksel.

Često je intenzitet kod sive skale sačuvan u 8 bita što daje 256 mogućih različitih nijansi sive, od crne do bele boje. Ako su nivoi sive ravnomerno raspoređeni, onda je razlika između dve susedne nijanse sive boje bolja nego što ljudsko oko može da razlikuje.

Kod digitalne slike u sivoj skali svaki piksel ima samo jednu vrednost, odnosno sadrži u sebi celu (i jedinu) informaciju o intenzitetu. Slike u ovoj skali sastavljene su isključivo od nijansi sive boje, idući od crne za najslabiji intenzitet, do bele za najveći kao što je prikazano na slici 11. Iz tog razloga se koriste za predstavljanje intenziteta svetlosti u elektromagnetnom spektru, i kao takve mogu predstavljati monohromatske slike jer prikazuju samo frekvenciju.

Za razliku od binarnih slika koje imaju samo dve boje (crnu i belu), slike u sivoj skali imaju mnogo nijansi sive boje.

Slika 11. Skala nijansi sive boje
Figure 11. Grey scale



Piksel

Piksel (engl. pixel, skraćeno od picture element, deo slike) je najmanji deo digitalne slike kojoj se mogu dati boja i druge osobine ili koji se može obrađivati.

Piksel je takođe najmanja adresibilna tačka koju monitor može da predstavi. Kod monitora sa katodnom cevi jedan piksel čine tri jako bliske tačke sa bojama crvenom, zelenom i plavom. Menjanjem intenziteta boje svake od ove tri tačke se menja boja piksela. Kod LCD ili TFT ekrana pikseli su unapred čvrsto definisani kao mali kvadrati ili pravougaonici. Svaki od njih je podeljen na još tri površine koji se nazivaju subpikseli i takođe nose boje: crvenu, zelenu i plavu.

Piksel se ne mora isključivo odnositi na mali kvadrat. Na slici 12. se vidi kako se sve može rekonstruisati slika na osnovu seta vrednosti piksela, pomoću tačaka, linija ili izjednačavanjem [17].



a) b) c)
 Slika 12. Detalj prikazan različitim vrstama piksela: a) u vidu tačaka, b) u vidu pravougaonika, c) izjednačavanjem
 Figure 12. Detail of image with different sorts of pixels a) point pixels, b) pixels in form of bars c) equalization of image with pixels

Piksel se može posmatrati na više načina, kao piksel na stranici, nošen električnim signalom, ili predstavljen digitalnom vrednošću, kao piksel na displeju ili na digitalnoj kameri. O pikselu se može govoriti apstraktno ili kao o jedinici mere, često se koristi kao mera rezolucije. Što više piksela je upotrebjeno na slici, toliko rezultat više liči na original. Broj piksela na slici se često naziva rezolucija, mada ona ima užu definiciju. Broj piksela je jedan broj, npr. 3,1 MP na digitalnoj kameri. On se ne mora poklapati sa brojem piksela na ekranu. Piksel sa digitalizovane slike (kao JPEG file) može i ne mora da se poklapa sa pikselima ekrana, u zavisnosti od toga kako kompjuter prikazuje sliku.

JPEG format slike podržava 8 bita po boji (crvenoj, zelenoj i plavoj) i pravi relativno male komprimovane fajlove. Sve digitalne kamere čuvaju slike u ovom formatu. TIF format slike ne komprimuje slike, ali su one zbog toga velike, što se može videti pri povećanju rezolucije.

Broj različitih boja koje se mogu predstaviti pikselom zavise od broja bita po pikselu³.

Svakim dodatim bitom stepenuje se broj boja koje su na raspolaganju:

1 bpp, $2^1 = 2$ boje (monohromatska)

2 bpp, $2^2 = 4$ boje

3 bpp, $2^3 = 8$ boja

8 bpp, $2^8 = 256$ boja

16 bpp, $2^{16} = 65,536$ boja

24 bpp, $2^{24} \approx 16.7$ miliona boja

³ Engl. bpp- bits per pixel. Ovakva slika koristi jedan bit za svaki piksel.

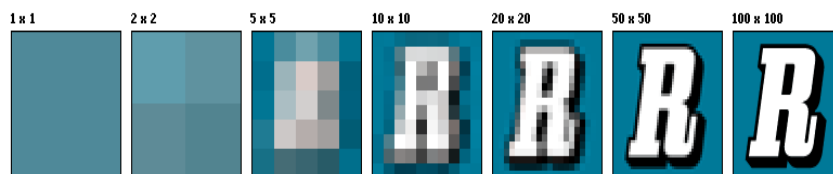
Rezolucija slike

Rezolucija slike opisuje detalje koje sadrži slika. Termin se koristi podjednako za digitalne, filmske i druge tipove slika. Veća rezolucija znači više detalja na slici.

Može se meriti na različite načine. U osnovi, rezolucija određuje koliko blizu mogu biti linije, a da se i dalje mogu razlikovati.

Termin rezolucija se često koristi za broj piksela na digitalnoj slici. Drugi uobičajen način korišćenja rezolucije je ukupan broj piksela na slici, uglavnom dat kao broj megapiksela koji se dobija množenjem piksela po koloni i po redu i deljenjem sa milion. Još jedan način izražavanja je broj piksela po jedinici dužine ili površine⁴. Slika koja ima 2048 piksela po širini i 1536 po dužini ima ukupno $2048 \times 1536 = 3\,145\,728$ piksela odnosno 3,1 megapiksela. Kako broj megapiksela kamere raste, tako se povećava i njena mogućnost da proizvede veću sliku [18].

Na slici 13. je data ilustracija kako jedna slika može izgledati u različitim rezolucijama.



Slika 13. Slika slova „R” u različitim rezolucijama
Figure 13. Image of letter „R“ presented in different resolutions

Matematička morfologija

Polje matematičke morfologije svojim raznolikim operacijama doprinosi analizi slike zasnivajući se na osnovnim teorijama. Operacije su naročito korisne za analizu binarnih slika i uključuju prepoznavanje granice slike, deljenje na segmente, isticanje.

Dve osnovne operacije matematičke morfologije su erozija (smanjenje granica slike) i dilatacija (povećanje granica slike) [19].

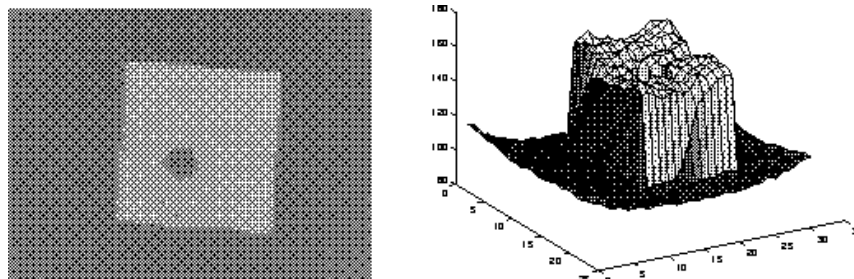
Za binarnu sliku, beli pikseli se obično koriste za predstavljanje prednjeg plana, dok se crni koriste za pozadinu. Zatim se jedan par koordinata koji odgovara slici prenosi u trodimenzionalni koordinatni sistem, pri čemu svi beli pikseli predstavljaju prvi plan. Uzima se da je original u jednom uglu tako da su svi elementi pozitivni.

Za sliku u sivoj skali vrednost intenziteta predstavlja visinu iznad horizontalne ravni u 3D koordinatnom sistemu, kao što se vidi na primeru prikazanom na slici 14.

Uobičajeno je da se koriste algoritmi kako bi se svi parovi tačaka prebacili u 3D koordinatni sistem. Na ovaj način se može rekonstruisati bilo koja površina na osnovu digitalne slike.

Binarna morfologija je poseban slučaj morfologije slike u sivoj skali jer polazna slika ima samo dve nijanse sive, sa vrednostima 0 i 1.

⁴ Engl. ppi- piksela po inču, odnosno ppsi- piksela po inču na kvadrat

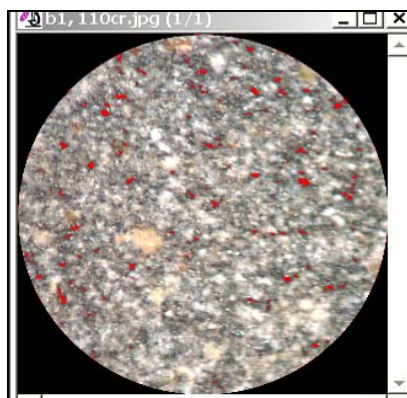


Slika 14. Jednostavna slika u sivoj skali i odgovarajuća površina u prostoru
Figure 14. Simple image in gray scale and corresponding surface 3D-diagram

3.2. Metoda analize slike

Image-Pro Plus je specijalizovani program za analizu i obradu slike., koji prepoznaje i omogućava rad svim poznatim formatima slika. Uz pomoć kolor i kontrast filtera je moguće brojanje i praćenje uočenih objekata, ručno i automatski, merenje veličine posmatranih objekata, učestanosti njihovog pojavljivanja, itd. Program je direktno povezan sa Excelom, što omogućava statističku i kvantitativnu obradu i prikazivanje dobijenih podataka. Image Pro Plus može raditi sa snimcima dobijenim na optičkom i SEM mikroskopu.

Kod betona, Image-Pro Plus se može koristiti za analizu sastava na osnovu faza i uključaka uočenih na površini uzoraka, praćenja promene poroznosti (promene količine i udela pora, površine pod porama, dijametra pora, itd.), zatim praćenja promene učešća pojedinih faza, i oštećenja, oblika i veličine zrna, njihove sferičnosti, itd (Slika 15.). Dobijeni numerički podaci se mogu povezati sa mehaničkim karakteristikama ili se mogu uporediti sa rezultatima klasičnih metoda za ispitivanje svojstava materijala (npr. poroznost).



Slika 15. Izgled Image Pro Plus prozora pri određivanju poroznosti na uzorku betona
Figure 15. Window on ImagePro Plus program during determination of prosity for concrete based on recycled shamote

4. Zaključak

U cilju dobijanja konstrukcionih betona visokih performansi koji se primenjuju u savremenom građevinarstvu neophodan je multidisciplinarni pristup u trijadi struktura-svojstvo-primena. To, naime, znači pravilan izbor polaznih komponenata za pripremu betonske mešavine i karakterizacija dobijenih kompozita. Za izvršenje oba zahteva neophodno je poznavanje mikrostrukture betonskih kompozita. Danas, upravo savremene instrumentalne metode omogućuju ovakav pristup izučavanju i projektovanju konstrukcionih betona.

Acknowledgement:

Ispitivanja u ovom radu omogućilo je Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (projekti 19012 i 16004).

Literatura

- [1] Ispitivanje nemetalnih mineralnih komponenata za primenu u konstrukcionim materijalima, A. Terzić, D. Izvonar, Lj.Pavlović, monografija, ITNMS, Beograd, 2007
- [2] Diversifying Two Stage Mixing Approach (TSMA) for Recycled Aggregate Concrete TSMAs and TSMAsc, V.W.Y Tam, C.M.Tam, Concrete and Building Materials, article in press, 2007
- [3] Effect of Microstructure of ITZ on Compressive Strength of Concrete Prepared with Recycled Aggregate, C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, Concrete and Building Materials, 18, 2004, p. 461 – 468
- [4] Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete, N. Otsuki, S. Miyazato, W. Yodsudjai, Journal of Materials in Civil Engineering, september/october 2003, p. 443 – 451
- [5] Principi nauke o materijalima, M.M. Ristić, SANU, Beograd, 1993
- [6] Z. Bazant, M.F.Kaplan, Concrete at High Temperatures, Material Properties and Mathematical Models, Concrete Design and Construction Series, Longmann Group, London, 1996
- [7] M. Posarac, M. Dimitrijevic, T. Volkov-Husovic, A. Devecerski, B. Matovic, "Determination of thermal shock resistance of silicon carbide/cordierite composite material using nondestructive test methods", J. Eu. Ceram. Soc. 28, 1275–1278, (2008)
- [8] D.N. Boccaccini, M. Canio, T. Volkov Husovic, "Service Life Prediction for Refractory Materials", J. Mater. Sci, 43, [12], 4079-4090, (2007)
- [9] T. Volkov Husovic, R. Jancic, D. Mitrakovic, "Image analysis used to predict thermal stability of refractories", Am. Ceram. Soc. Bull., 84 [10], 1–5, (2005)

- [10] T. Volkov Husovic, J. Majstorovic, M. Cvetkovic, "Thermal stability of alumina-based refractory", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 85 [3], (2006)
- [11] T. Volkov, R. Jancic, D. Mitrakovic, "Using the image analysis program for prediction of thermal stability behavior of refractory specimen", *Mater.Sci.Forum*, 492/493,561–566, (2005).
- [12] D.N. Boccaccini, M. Romagnoli, E. Kamseu, P. Veronesi, C. Leonelli, G.C. Pellacani, "Determination of thermal shock resistance in refractory materials by ultrasonic pulse velocity measurements", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 27 [2/3], 1859–1863, (2007)
- [13] F. Aly, C.E. Semler, "Prediction of refractory strength using non destructive sonic measurements", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 64 [12], 1555–1558, (1985)
- [14] I.A. Altun, "Effect of temperature on the mechanical properties of self-flowing low cement refractory concrete", *Cement and Concrete Res.* 31, 1233-1239, (2001)
- [15] [G. Thomas, ANALYSE D'IMAGE, Axe Génie des Procédés, centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne, policopier de cours www.emse.fr/fr/transfert/spin/formation/ressources/sam96/fichierspdf/animage.pdf
- [16] www.wikipedia.org/wiki/Digital_Image
- [17] www.wikipedia.org/wiki/Pixel
- [18] www.wikipedia.org/wiki/Image_Resolution
- [19] <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/resource.htm>