

Primljen / Received: 22.2.2012.
 Ispravljen / Corrected: 15.8.2012.
 Prihvaćen / Accepted: 7.9.2012.
 Dostupno online / Available online: 15.10.2012.

Deformacije skupljanja betona - uzroci i vrste

Autori:



Doc.dr.sc. **Merima Šahinagić-Isović**, dipl. ing. građ.
 Univerzitet "Džemal Bijedić" u Mostaru
 Građevinski fakultet
merima.sahinagic@unmo.ba



Prof.dr.sc. **Goran Markovski**, dipl. ing. građ.
 Univerzitet "Sv. Kiril i Metodije" Skopje
 Građevinski fakultet
markovski@gf.ukim.edu.mk



Marko Čeček, dipl. ing. građ.
 Univerzitet "Džemal Bijedić" u Mostaru
 Građevinski fakultet
marko.cecek@unmo.ba

Pregledni rad

Merima Šahinagić-Isović, Goran Markovski, Marko Čeček

Deformacije skupljanja betona - uzroci i vrste

Skupljanje predstavlja vremensku deformaciju smanjenja volumena betona bez djelovanja vanjskih sila. Na vremenski tijek i konačne vrijednosti skupljanja utiče vrlo mnogo čimbenika: temperatura i vlažnost okoline, dimenzije elementa, vrsta i količina cementa, v/c faktor, granulometrijski i mineraloški sastav agregata, čvrstoća betona, način ugradnje i njega betona, starost betona u trenutku prekida njega i dr. Suštinski, ono je kombinacija nekoliko elementarnih vrsta skupljanja koji će biti izneseni u radu.

Ključne riječi:

skupljanje betona, vrste skupljanja, v/c faktor, njega betona

Subject review

Merima Šahinagić-Isović, Goran Markovski, Marko Čeček

Shrinkage strain of concrete - causes and types

The shrinkage represents a time dependent deformation which reduces the volume of concrete, without the impact of external forces. The time flow and the final values of shrinkage are influenced by numerous factors: temperature and humidity, dimensions of elements, the type and quantity of cement, w/c factor, granulometric and mineralogical composition of aggregates, concrete strength, method of workability and curing, concrete age at the end of curing and many other factors. Basically, it is a combination of several basic types of shrinkage which will be presented in this paper.

Key words:

concrete shrinkage, types of shrinkage, w/c factor, curing

Übersichtsarbeit

Merima Šahinagić-Isović, Goran Markovski, Marko Čeček

Deformierungen der Betonzusammenziehung – Ursachen und Arten

Kontraktion stellt eine durch Zeit bedingte Deformation der Verminderung des Betonvolumens ohne Einwirkung von Außenkräften dar. Auf den zeitlichen Verlauf und die Endwerte üben viele Faktoren Einfluss: Temperatur und Feuchtigkeit der Umgebung, Elementdimensionen, Art und Menge des Zements, W/Z -Faktor, die Zusammensetzung von Korngröße und Mineralogie des Aggregats, Betonfestigkeit, Art des Einbaus und Betonpflege, Betonalter zum Zeitpunkt der Pflegebeendigung u. A. Im Grunde handelt es sich um eine Kombination von mehreren elementaren Kontraktionsarten, die in der Arbeit bearbeitet werden.

Schlüsselwörter:

Zusammenziehung von Beton, Kontraktionsarten, W/Z- Faktor, Betonpflege

1. Uvod

Tijekom očvršćivanja betona od utjecaja hidratacije cementa kao i procesa sušenja betona uslijed gubitka vode dolazi do smanjenja zapremine očvrstlog betona. Svojstvo betona da tijekom vremena mijenja svoj volumen u dužem razdoblju i to u obliku smanjivanja dimenzija neopterećenih betonskih uzoraka približno proporcionalno u svim pravcima, naziva se skupljanje betona. Beton kao porozno čvrsto tijelo deformira se čim je izložen mehaničkim, termičkim ili hidrološkim djelovanjima, tako da podrijetlo skupljanja možemo razmatrati s tri aspekta: kemijski, termički i hidrološki procesi (eng. hygral process) [1].

Hidrološka djelovanja, kao i termička, posljedica su ili promjena uvjeta okoline ili promjena unutar mase betona. Pod promjenom uvjeta okoline razmatramo promjene temperature i vlažnosti, a pod promjenama unutar mase betona razmatramo: toplinu proizvedenu hidratacijom cementa i samoisušivanje (eng. self-desiccation [2, 3]), što je posljedica nastavka hidratacije nakon vezivanja betona, tj. smanjenja relativne vlažnosti zbog procesa hidratacije [2]. Sve te promjene izazivaju padove temperaturnog i hidrauličkog potencijala konstrukcije, odnosno izazivaju gubitak uvjeta ravnoteže s okolnom sredinom. Zbog toga deformacije koje nastaju na ovaj način nisu nikada jednolike, izazivajući konstrukcijska djelovanja i napone.

2. Potrebne karakteristike materijala za definiranje skupljanja

Kako bismo razumjeli, analizirali i kvantificirali sve utjecaje na skupljanje betona, trebamo informacije o sljedeća četiri elementa:

- mehanički utjecaj od temperaturnih promjena
- termički utjecaj hidratacije cementa
- hidrološki utjecaji vezano za hidrataciju
- hidrološki utjecaji vezano za klimu [1].

Za definiranje mehaničkog utjecaja od temperaturnih promjena potrebno je utvrditi vrijednosti promjene temperature tijekom vremena te promjene modula elastičnosti betona i koeficijenta toplinskog istezanja (ekspanzije) (CTE - Coefficient of Thermal Expansion). Za navedene parametre potrebno je odrediti zakonitosti njihove promjene u vremenu. Modul elastičnosti je deformacija betona pod kratkotrajnim opterećenjem. Znatnije se razvija s očvršćivanjem materijala, isto kao i mehanička čvrstoća, pa ga možemo smatrati, slično tlačnoj čvrstoći, kao monotono kontinuiranu rastuću funkciju starosti betona. Na modul elastičnosti kompozita najveći utjecaj ima izbor agregata: prvo, zbog većega udjela agregata (70-80 %) u ukupnoj masi kompozita u odnosu na udio cementne paste, a drugo, jer općenito postoji manje slobode za izmjene parametara koji mijenjaju modul kod agregata

nego kod cementne paste. Taj drugi razlog je čvrsto povezan i s utjecajem agregata na mehaničku čvrstoću kompozita.

Kao i modul elastičnosti, zbog odnosa volumena, linearni toplinski koeficijent istezanja betona ovisi više o agregatu nego o cementnoj pasti. Linearni toplinski koeficijent istezanja cementne paste mijenja se od 11×10^{-6} do $20 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, ovisno o vlažnosti, a linearni toplinski koeficijent istezanja agregata mijenja se od 1×10^{-6} do $14 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, ovisno o vrsti stijene. Vrijednosti linearnog toplinskog koeficijenta istezanja betona mogu biti u rasponu od 6 do $7 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ za beton s krečnjačkim agregatom, pa sve do vrijednosti od 12 do $13 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ za betone sa silicijskim agregatom. U praksi se najčešće s dovoljnom točnošću usvaja vrijednost linearnog toplinskog koeficijenta istezanja za beton od $10 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$. S druge strane, suprotno E-modulu, linearni toplinski koeficijent istezanja je zapravo konstantan nakon prvih nekoliko sati vezivanja. On ima važnu ulogu u elementima koji su izloženi uvjetima spriječenih deformacija, u slučajevima masivnih konstrukcija (kao npr. brane) ili u slučajevima elemenata izloženih velikim promjenama temperature (kao npr. nogostupi).

Za opisivanje termičkih utjecaja hidratacije cementa nužno je utvrditi prije spomenute parametre i zakonitost koja opisuje razvoj topline tijekom hidratacije. Toplina hidratacije cementa je količina topline po gramu nehidratiziranog cementa, koja se oslobodi tijekom procesa hidratacije. Ovisi o kemijskom sastavu cementa (raste s količinom C_3A) i o finoći mliva. Toplina hidratacije cementa je važno svojstvo u masivnim konstrukcijskim elementima (kao npr. brane, temeljni blokovi) i kada su elementi izloženi uvjetima spriječenih graničnih deformacija (kao npr. nogostupi, betonske ploče kompozitne strukture), odnosno u konstrukcijama umjerenijih debljina (manjih od 20 cm), kada je jedna strana toplinski izolirana. Kod ove dvije vrste konstrukcija utjecaj se termičkih skupljanja superponira s njihovim autogenim skupljanjem. Uslijed hidratacije, zbog oslobađanja topline, najprije dolazi do toplinskog širenja betona, nakon čega dolazi do procesa hlađenja betona koje predstavlja toplinsko skupljanje. Betoni koji imaju visoku toplinu hidratacije često su takvi da imaju veliko autogeno skupljanje, kao što je u slučaju betona visoke čvrstoće.

Za hidrološke utjecaje vezano za hidrataciju treba ustanoviti zakonitost razvoja skupljanja određenu u nedostatku bilo kakve hidrološke izmjene s okolinom. Ti utjecaji daju autogeno skupljanje, koje je ravnomjerno. Promatrajući ga s određene skale na kojoj se beton kao granulirani materijal može smatrati homogenim, ono predstavlja peterostruku vrijednost od najkrupnijega zrna agregata [1]. Autogeno skupljanje je, dakle, unutrašnja karakteristika materijala i neovisno je o veličini uzorka.

Za hidrološke utjecaje vezano za klimu treba ustanoviti zakonitost razvoja skupljanja uslijed uvjeta okoline, koji predstavljaju prirodno sušenje. Pod uvjetima okoline

podrazumijevamo temperaturu i vlažnost okoline. Osim toga, ova zakonitost mora biti pokazatelj kvantitativnih karakteristika dimenzija elemenata, od kojih ovisi dinamika sušenja uzorka. Ovi utjecaji daju skupljanje uslijed sušenja koje ovisi o veličini elementa, te zato nije unutrašnja karakteristika materijala.

3. Vrste skupljanja

Klasična podjela deformacije skupljanja betona prema [4] jest:

- skupljanje uslijed isparavanja vode tijekom razdoblja vezivanja cementa (plastično skupljanje)
- skupljanje uslijed kontrakcije sastojaka hidratacije (hidratacijsko skupljanje)
- skupljanje nakon završetka procesa vezivanja cementa (skupljanje očvrstnalog betona uslijed sušenja ili hidraulično skupljanje)

dok prema [5] to je:

- autogeno skupljanje
- plastično skupljanje
- skupljanje očvrstnalog betona uslijed sušenja
- skupljanje uslijed karbonatizacije.

No, skupljanje betona je prilično složen fenomen koji ovisi o nizu čimbenika te predstavlja kombinaciju nekoliko elementarnih oblika skupljanja:

- plastično skupljanje, koje se razvije na površini svježeg betona izloženoj sušenju
- kemijsko skupljanje, što je posljedica kemijskog vezanja odnosno uporabe vode u betonu u procesu hidratacije cementa
- autogeno skupljanje, neki ga nazivaju i hidratacijsko skupljanje, usko je vezano s kemijskim skupljanjem, posljedica je samoisušivanja u porama cementne paste u procesu hidratacije još nehidratiziranog cementa
- skupljanje uslijed sušenja, kad je betonski element izložen okolini, pri čemu isparava voda iz kapilara
- termičko skupljanje, koje nastane zbog promjene temperature u betonu u procesu hidratacije
- skupljanje uslijed karbonatizacije, gdje ugljikov dioksid iz okoline uzrokuje kemijske reakcije u cementnom kamenu.

Uzrok svih oblika skupljanja, osim skupljanja uslijed karbonatizacije koje je posljedica reakcije hidratizirane cementne paste s ugljikovim dioksidom iz okoline u prisutnosti vlage, jest gubitak odnosno uporaba vode u betonu. Voda može izlaziti iz betona u okolinu ili se potrošiti pri hidrataciji cementa. Stoga su veličina i stupanj skupljanja betona uvelike ovisni o vodocementnom odnosno vodovezivnom omjeru betonske mješavine, tj. o čvrstoći betona. Ukupno skupljanje treba uzeti kao zbroj svake pojedine promjene volumena uslijed karbonatizacije, toplinskih promjena, sušenja i autogenog skupljanja [2].

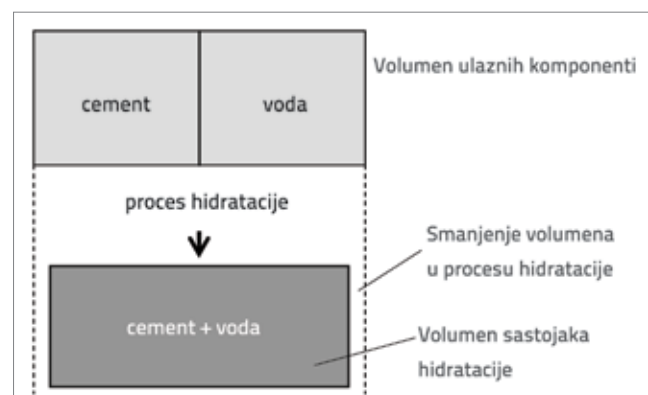
3.1. Plastično skupljanje

Plastično skupljanje se razvija na površini svježeg betona, tj. posljedica je isparavanja vode s površine svježeg betona ili upijanja vode u oplatu ili podlogu betona. Najveće je u usporedbi s ostalim vrstama skupljanja, može biti reda veličine 1% od volumena cementa. Zbiva se vrlo brzo u prvih nekoliko sati, pa se kao takvo uglavnom i ne registrira. Obično nije značajno u odnosu na stanje naprezanja konstrukcija jer se događa u okviru još uvijek fluidne mase svježeg betona. Javlja se u slučajevima kada uslijed isparavanja vode dođe do zgrušavanja mješavine i do zblizavanja čestica sadržanih u svježem betonu. Skupljanje površinskog sloja je spriječeno unutrašnjim dijelom betona koji se ne skuplja, što rezultira vlačnim naprezanjima u površinskom sloju. Ta naprezanja mogu biti veća od vlačne čvrstoće još mladog betona, pa se javljaju tzv. plastične pukotine, plitke i dosta široke. Veće količine cementa povećavaju plastično skupljanje. Štetni učinci ove vrste skupljanja mogu se relativno lako izbjeći pravilnom i intenzivnom njegovom betona, tj. močenjem površina elemenata (ili pokrivanjem membranama), kako bi se nadoknadila izgubljena voda (ili spriječilo njeno isparavanje).

3.2. Kemijsko skupljanje

Kemijsko skupljanje cementne paste znači smanjenje njezinoga volumena, a javlja se zbog kemijskog vezanja vode u procesu hidratacije cementa.

U procesu stvrdnjavanja betona zbiva se u cementnoj pasti više kemijskih promjena, i to je izravna posljedica smanjenja njezinoga volumena. Ova pojava je jasno shematski prikazana na slici 1. Rezultirajući volumen sastojaka hidratacije, koji se formira u reakciji vode i cementa, manji je od volumena ulaznih komponenti: cementa i vode zajedno. Glavni razlog smanjenja volumena cementne paste, ako usporedimo s volumenom vode i cementa, jest veća gustoća kemijski vezane vode u usporedbi sa slobodnom vodom mješavine prije vezanja.



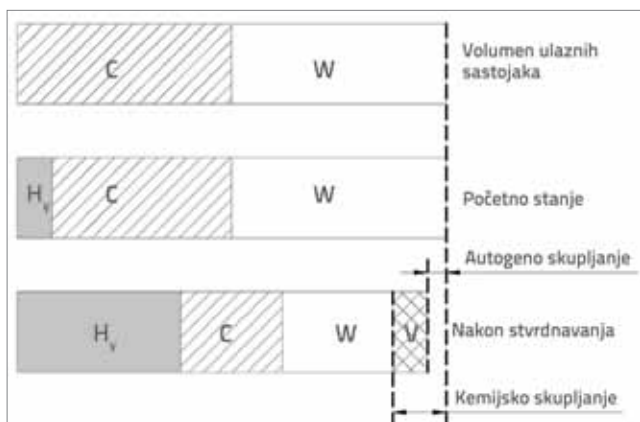
Slika 1. Shematski prikaz mehanizma kemijskog skupljanja [6]

Unutarnje sile koje se javljaju s razvojem mikrostrukture očvršćivanjem cementne paste uzrokuju odgovarajuće

deformacije cementne paste odnosno betona. Na određenom stupnju procesa očvršćivanja dolazi do skupljanja cementne paste, što uzrokuje dodatne prazne pore, a to pridonosi povećavanju zajedničkog volumena pora u cementnoj pasti koja očvršćuje. Pore nastale uslijed kemijskog skupljanja imaju značajnu ulogu u autogenom skupljanju [6].

3.3. Autogeno skupljanje

Autogeno skupljanje betona, koje neki nazivaju i hidratacijsko skupljanje, posljedica je samoisušivanja u porama cementnog kamena zbog uporabe (konzumacija) vode u procesu hidratacije cementa [7]. Kemijsko i autogeno skupljanje su dosta povezani, pa je teško odrediti granicu između tih dviju vrsta skupljanja. Najprije se dogodi kemijsko skupljanje, nastaju dodatne pore uslijed hidratizacije, pa u tim porama počinje samoisušivanje zbog procesa hidratizacije, tj. unutar strukture cementnog kamena potroši se sva voda na hidratizaciju, a vlaga ne može dovoljno brzo dolaziti izvana zbog guste strukture te dolazi do skupljanja (pa i pukotina unutar betona) nazvanog autogeno skupljanje (slika 2.). Veći dio autogenog skupljanja dogodi se već u prvom mjesecu, odnosno u prvim danima, a počinje već nekoliko sati poslije miješanja, što inače ovisi o vrsti mješavine.

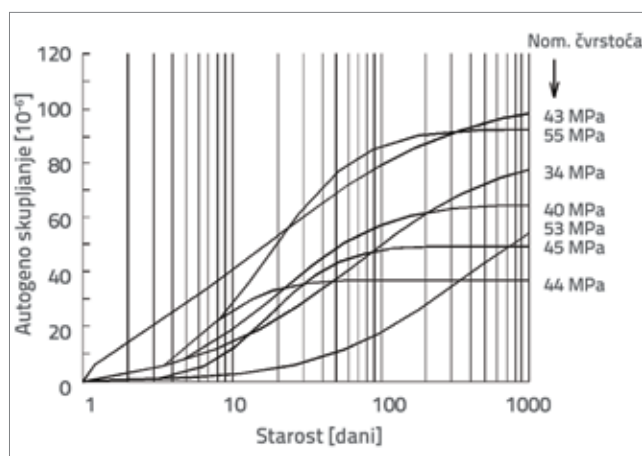


Slika 2. Odnos između autogenog i kemijskog skupljanja: C-nehidratizirani cement; W-nehidratizirana voda; H_v -sastojak hidratacije; V-pore nastale hidratacijom [3]

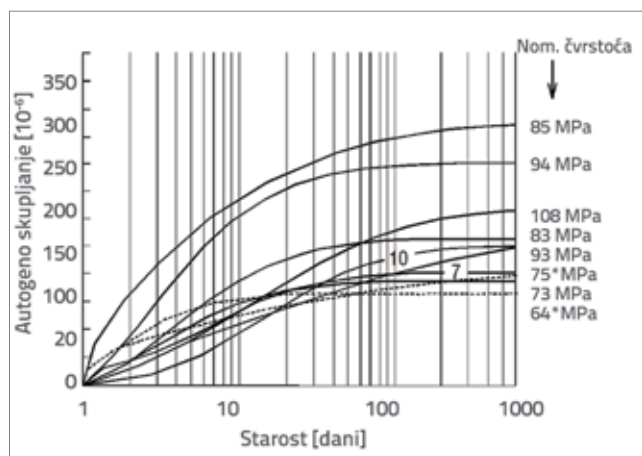
Teorijski stupanj razvoja autogenog skupljanja određen je stupnjem hidratacije cementa, pa se zato veći dio autogenog skupljanja dogodi već u prvom mjesecu. Vremenska je zakonitost razvoja ovih deformacija izravno povezana s dinamikom hidratacije cementa, što također s druge strane kontrolira razvoj vrijednosti mehaničkih čvrstoća betona. Parametri koji utječu na tu dinamiku prema tome su isti oni koji djeluju na porast vrijednosti čvrstoće: vrsta i finoća mliva cementa i vodocementni omjer (v/c). Krivulja razvoja autogenog skupljanja, prema tome, prilično se dobro podudara s krivuljom razvoja mehaničke čvrstoće. U prvih nekoliko dana veoma brzo dostiže 60 do 90 % vrijednosti skupljanja od 28

dana. Ukupni intenzitet autogenog skupljanja je umjeren, s tim da kada se doda na druga skupljanja, dobiju se neznatne vrijednosti: 100 do 300 x 10⁻⁶. Stupanj njegova razvoja u ranoj starosti je takav da je ovo skupljanje dugo vremena bilo zanemareno od stručnjaka, zato što konvencionalni testovi skupljanja (bar oni korišteni za određivanje zakonitosti navedenih u proračunskim pravilima) počinju od 48 sati ili od 3 dana.

Autogeno skupljanje ostaje manje od 10⁻⁴ (slika 3.) u betonima čiji je vodocementni omjer (v/c) veći od 0,45, ali povećava se vrlo brzo kada taj omjer pada ispod 0,40, i može dostići vrijednost do 3 x 10⁻⁴ (slika 4.) [1].



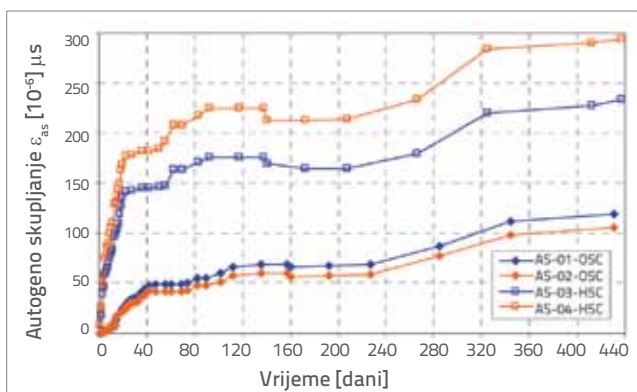
Slika 3. Autogeno skupljanje običnih betona različitih čvrstoća [1]



Slika 4. Autogeno skupljanje betona visoke čvrstoće različitih čvrstoća ("*- bez silicijske prašine) [1]

Kod betona uobičajene čvrstoće s vodocementnim omjerom 0,54, koje su ispitivali u nizozemskom istraživačkom centru TNO [8], izmjereno autogeno skupljanje bilo je zanemarivo malo. Ta je činjenica vjerojatno razlog da u prošlosti, u istraživanjima betona uobičajene čvrstoće, autogenom skupljanju nisu posvetili posebnu pažnju. Međutim, kod betona visoke čvrstoće s vrlo malim vodocementnim omjerima, autogeno skupljanje predstavlja značajan dio

cjelokupnog skupljanja. Općenito vrijedi da se autogeno skupljanje povećava sa smanjenjem vodocementnog omjera. Rezultati eksperimenata, koje su napravili u Francuskoj [9], pokazali su kako je smanjenje vodocementnog omjera s 0,41 na 0,33 prouzročilo povećanje autogenog skupljanja za 56. to znači da je autogeno skupljanje kod betona visoke čvrstoće znatno veće nego kod betona uobičajene čvrstoće. Neki istraživači zaključuju da je to 2 do 2,5 puta [10]. Autogeno skupljanje betona krajnje visokih performansi još izražajnije je, dok je skupljanje uslijed sušenja iznimno malo [11]. Kod samozbijajućih betona, zbog velikog volumena cementne paste, također je autogeno skupljanje vrlo veliko [12]. Slično se može zaključiti iz rezultata vlastitih eksperimentalnih ispitivanja [6], pri čemu su ispitivane mješavine običnog betona i betona visoke čvrstoće u obliku prizmi dimenzija 10/10/40 cm, starosti 420-430 dana. Ispitivani obični beton imao je vodocementni omjer $v/c = 0,58$, a srednju vrijednost autogenog skupljanja 112×10^{-6} , dok je beton visoke čvrstoće imao vodocementni omjer $v/c = 0,36$, a srednju vrijednost autogenog skupljanja 264×10^{-6} (slika 5.). Iz rezultata se vidi da je autogeno skupljanje betona visoke čvrstoće veće od autogenog skupljanja običnog betona za približno 2,3 puta.



Slika 5. Autogeno skupljanje običnog betona (OSC - Ordinary Strength Concrete) i betona visoke čvrstoće (HSC - High Strength Concrete)

Autogeno skupljanje povećava se i s povećanjem udjela mikrosilike, što je posljedica finije mikrostrukture hidratizirane cementne paste. Prema istraživanju Le Royja i De Larrarda [9], autogeno skupljanje betona se pri udjelu 8 % mikrosilike s obzirom na masu cementa poveća za 40 %.

3.4. Skupljanje uslijed sušenja

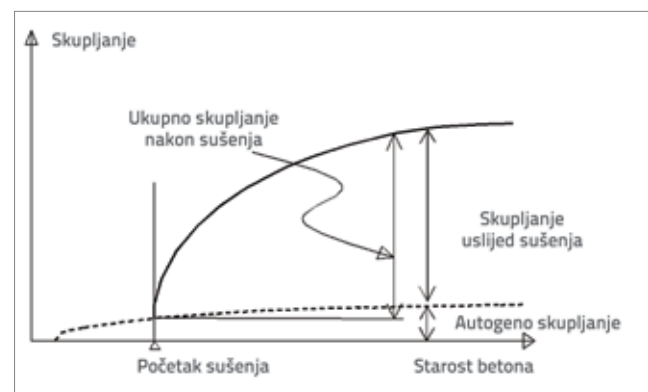
Suprotno skupljanju samoisušivanjem (autogenom skupljanju), ova vrsta skupljanja se očituje od površine prema unutrašnjosti betonske mase. Skupljanje uslijed sušenja odnosi se na smanjenje volumena betona zbog gubitka vode iz betona. U početku slobodna voda izlazi na betonsku površinu u obliku mjehurića. Nakon isparavanja vode s površine dolazi do izvlačenja vode iz unutrašnjosti betonske mase [2]. Stupanj sušenja mijenja se po debljini elementa,

između njegove najveće vrijednosti (na površini) i najmanje vrijednosti (u jezgri).

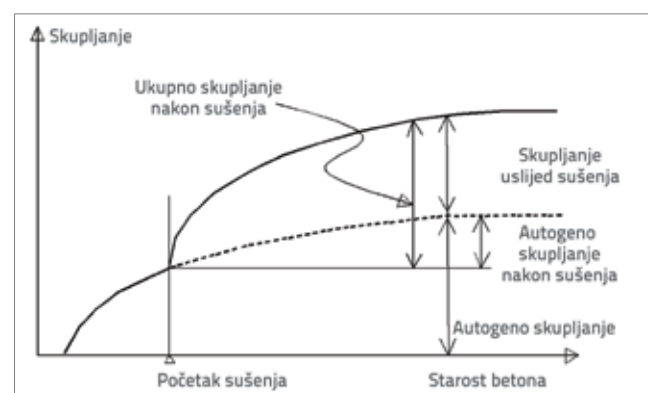
Skupljanje sušenjem varira između 2 i 6×10^{-4} i ovisi o mnogim parametarima. Parametri koji najviše utječu na tu vrstu skupljanja, poredani od najvećega prema najmanjemu utjecaju jesu:

- debljina elementa
- poroznost ili količina slobodne vode u betonu
- volumen paste
- finoća veziva
- temperatura i relativna vlažnost.

Mali vodocementni omjer i mala propusnost betona visoke čvrstoće imaju značajnu ulogu pri skupljanju betona uslijed sušenja. Ako je vodocementni omjer tako mali, da se kod hidratacije cementa potroši gotovo sva voda i relativna vlažnost unutar betona padne ispod 80 %, onda zapravo nema razmjene vlage između betona i tipičnog vanjskog okoliša. Mala propusnost betona visoke čvrstoće također je uzrok da je sušenje betona, ako ga uopće ima, ekstremno malo. Tako je skupljanje uslijed sušenja kod betona visoke čvrstoće znatno manje nego kod betona uobičajene čvrstoće. Odnos autogenog skupljanja i skupljanja uslijed sušenja u ukupnom sušenju betona, i to običnog i betona visoke čvrstoće, prikazano je na dijagramima (slike 6. i 7.) [13].

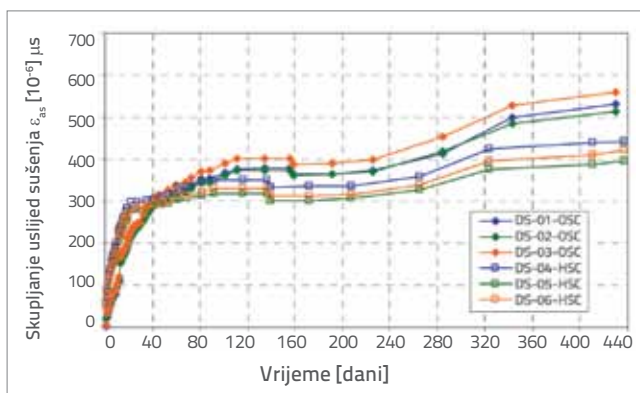


Slika 6. Skupljanje u običnom betonu [13]



Slika 7. Skupljanje u betonu visoke čvrstoće [13]

Eksperimentalni rezultati, koje su objavili Le Roy i de Larrard [9], prikazuju da se skupljanje uslijed sušenja sa smanjenjem vodocementnog omjera od 0,41 na 0,33 smanji za 54 %. Kod samozbijajućih betona također je primijećeno povećanje vrijednosti skupljanja uslijed sušenja s povećanjem v/c omjera [12]. Prisutnost mikrosilike u betonima visoke čvrstoće znatno smanji poroznost hidratizirane cementne paste, posebno u uskom dodirnom području između cementne paste i agregata. Vodu je iz finih pora teže prebaciti, a gusta cementna pasta i kvalitetno usko dodirno područje između agregata i cementnog kamena u betonu visoke čvrstoće s mikrosilikom daju veći otpor skupljanju. To znači da se s dodavanjem mikrosilike skupljanje betona uslijed sušenja smanjuje. Sicard i Pons [14] tvrde da se može skupljanje betona uslijed sušenja smanjiti za 50 % ako betonska mješavina sadrži mikrosiliku. Istraživanja Le Roya i De Larrarda [9] pokazuju da se skupljanje uslijed sušenja kod betona, kojem je bilo dodano 8 % mikrosilike s obzirom na masu cementa, smanji za približno 25 %. Eksperimentom koji je provela Šahinagić-Isović [6] zaključilo se da je skupljanje uslijed sušenja otprilike 27 % manje kod betona visoke čvrstoće u odnosu na običan beton. Ispitivanje je provedeno, kao u slučaju autogenog skupljanja, na prizmama dimenzija 10/10/40 cm koje su izrađene od običnog betona s v/c = 0,58 i betona visoke čvrstoće s v/c = 0,36. Srednja vrijednost skupljanja uslijed sušenja za običan je beton iznosila 535×10^{-6} , a za beton visoke čvrstoće 419×10^{-6} (slika 8).



Slika 8. Skupljanje uslijed sušenja običnog betona (OSC) i betona visoke čvrstoće (HSC)

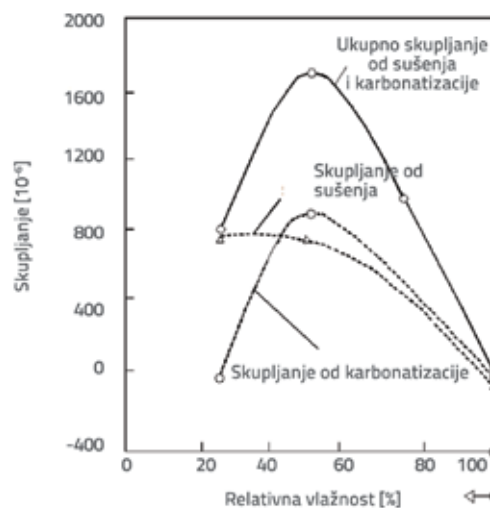
3.5. Termičko (temperaturno) skupljanje

Temperaturno deformiranje betona se javlja u ranoj starosti (u prvim danima) zbog promjene temperature uslijed procesa hidratacije. Pri kemijskoj reakciji cementa i vode u betonu se oslobađa toplina, što uzrokuje temperaturno širenje betona, a u daljnjem procesu dolazi do hlađenja smjese zbog čega se javlja deformacija skupljanja. Kolika će biti promjena temperature betona, ovisi o uvjetima u okolini i o sastavu betona. Posebnu pozornost treba obratiti na odabir cementa odgovarajućih svojstava. Pri projektiranju konstrukcija obično se traži ili rana čvrstoća betona ili niska toplina hidratacije ili poboljšana otpornost na kemijski agresivnu okolinu. Manja

temperatura mješavine svježeg betona rezultira sporijim porastom temperature i ravnomjernijim hlađenjem, odnosno ravnomjernijom disipacijom topline u okolinu. Zato je u slučaju betoniranja u ekstremno vrućim klimatskim uvjetima nužno hlađenje smjese svježeg betona. No više od mineraloškog sastava, na brzinu oslobađanja topline hidratacije utječe temperatura na kojoj se zbiva hidratacija, što ima veći utjecaj na ovaj oblik skupljanja nego ukupna toplina hidratacije. Termičko (temperaturno) skupljanje u ovisnosti o udjelu i vrsti cementa može dostići vrijednosti od 400 do 500×10^{-6} unutar betonskog elementa, čim debljina tog elementa prijeđe određenu vrijednost. Iskustvo stečeno na gradilištima pokazuje da samo u slučajevima ako je debljina betonskog elementa manja od 30cm (ili 20 cm ako je samo jedna strana izložena hlađenju), termički su učinci jednaki nuli ili su vrlo mali. Čim je ta debljina veća od 50 cm, od najbliže površine izložene hlađenju, temperature će betona rasti od 30 do 50°C (čak 55°C kad je velik udjel cementa visokih čvrstoća) i pucanje betona u smjeru hlađenja tada je neizbježno. Dinamika tog skupljanja je jednostavna: počinje s krajem vezivanja (maksimalna temperatura se dostiže u periodu između 20 i 40 sati), a trajanje hlađenja je proporcionalno kvadratu debljine elementa.

3.6. Skupljanje uslijed karbonatizacije

Skupljanje uslijed karbonatizacije se događa u očvrslom betonu. Djelovanjem CO₂ (ugljkova dioksida) iz okoline na cementni kamen dolazi do kemijskih reakcija. Ugljikov dioksid s vodom tvori ugljičnu kiselinu koja reagira s kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)₂) u cementnom kamenu stvarajući kalcijev karbonat (CaCO₃), pri čemu se razgrađuju i drugi spojevi cementnog kamena. Pri ovoj reakciji se oslobađa voda. U nezagađenoj atmosferi ugljikova dioksida ima 0,03 %, ali u gradovima i na autocestama ima ga do 0,3 %. Brzina napredovanja korozije cementnog kamena ovisi o strukturi pora, ali još više o njihovoj ispunjenosti vodom [5] (slika 9).



Slika 9. Skupljanje cementnog morta uslijed sušenja i karbonatizacije pri različitim relevantnim vlažnostima [5]

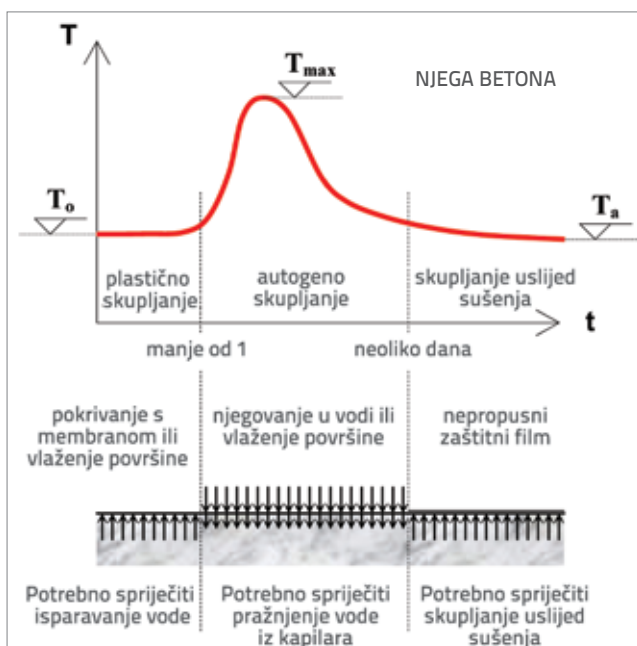
Napredovanje ugljikova dioksida bit će najsporije ako su pore ispunjene vodom. Međutim, ako u porama nema vode, ne nastaje ugljična kiselina, tj. ne dolazi do reakcije s kristalima vapna. Dakle, optimalni uvjeti za karbonatizaciju cementnog kamena su u djelomično vlažnom betonu.

Osim skupljanja, posljedica karbonatizacije cementnog kamena od običnog portlandskog cementa može biti povećanje čvrstoće, jer se kristali vapna zamjenjuju čvršćim kalcijevim karbonatom, koji popunjava strukturu, a voda koja se oslobađa može intenzivirati proces hidratacije. Uslijed karbonatizacije naročito se povećava čvrstoća betona, tako da tanki površinski sloj kore betona postane znatno tvrdi i kruči. Beton spravljen s cementom u kojem ima dodatka zgure, uslijed karbonatizacije dobiva na površini praškasti sloj.

4. Zaključna razmatranja o deformaciji skupljanja

U radu su objašnjene osnovne vrste skupljanja: skupljanje uslijed karbonatizacije, plastično skupljanje, temperaturno skupljanje, kemijsko skupljanje, autogeno skupljanje te skupljanje uslijed sušenja. Ta je podjela izvedena nakon pregleda i analiziranja brojne relevantne literature.

Dakle, ukupno skupljanje trebalo bi uzeti kao zbroj pojedinačnih promjena volumena nastalih uslijed karbonatizacije, toplinskog širenja, sušenja i autogenih deformacija. Uzrok je svih oblika skupljanja (osim skupljanja uslijed karbonatizacije) gubitak odnosno upotreba vode u betonu. Voda može izlaziti iz betona u okolinu ili se potrošiti pri hidrataciji cementa. Skupljanje uslijed karbonatizacije se događa u očvrslom betonu i naročito je izraženo kod konstrukcija na autocestama i velikim gradovima (količina ugljikova dioksida do 0,3 %).

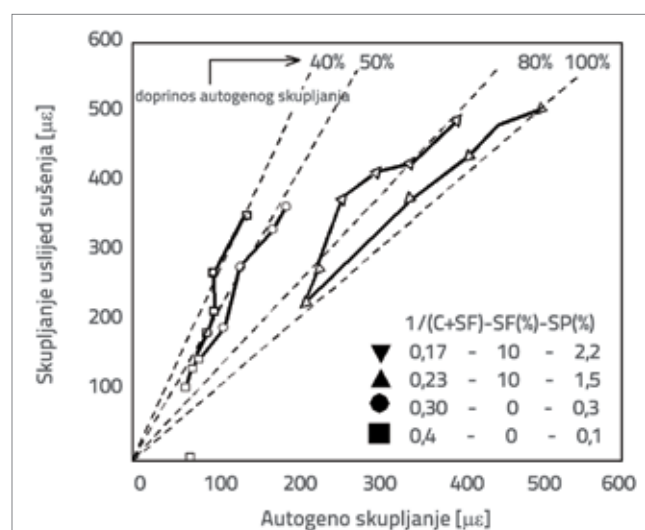


Slika 10. Tijek promjene temp. u betonskom konstrukcijskom elementu i shematski prikaz potrebnog tijeka njegovanja elementa [7]

Budući da je veći dio termičkog širenja reverzibilna (povratna) reakcija tijekom vremena, ona obično nije uključena u konačnu vrijednost ukupnog skupljanja. Ova vrsta skupljanja ima veće značajnije kod masivnih konstrukcijskih elemenata (kao npr. brana, temeljnih blokova) i kada su elementi izloženi uvjetima spriječenih rubnih deformacija, tj. kada je jedna strana termički izolirana (kao npr. nogostupi), te kod betoniranja u ekstremno vrućim klimatskim uvjetima. Kod takvih se vrsta konstrukcija utjecaj termičkog (temperaturnog) skupljanja superponira s njihovim autogenim skupljanjem, što se jasno vidi i na slici 10. Na dijagramu je prikazana ovisnost temperature i vremena u odnosu na tri osnovna oblika skupljanja, gdje T_0 predstavlja početnu temperaturu svježeg betona, T_a temperaturu okoline, a T_{max} maksimalnu temperaturu pri procesu hidratacije [7].

Već tijekom ugradnje betona potrebno je spriječiti isparavanje vode iz betona, tj. spriječiti plastično skupljanje na površini betona koji očvršćuje, što se ostvaruje vlaženjem površine betona ili pokrivanjem membranom. Plastično skupljanje je najveće u usporedbi s ostalim vrstama skupljanja, ali se događa vrlo brzo u prvih nekoliko sati, pa se stoga uglavnom i ne primjeti. Zapravo plastično skupljanje nije značajno u odnosu na naponska stanja konstrukcija jer se zbiva u okviru još uvijek fluidne mase svježeg betona.

Nadalje, kad je prirast temperature u betonu zbog procesa hidratacije cementa najveći, u elementu je prisutno najveće autogeno skupljanje. U tom je razdoblju potrebno njegovanje u vodi ili vlaženje površine zbog sprječavanja pražnjenja vode u kapilarama. Kada se poslije nekoliko dana završi njegovanje vodom, konstrukciju treba premazati, odnosno zaštititi nepropusnim filmom, kako bi se spriječilo skupljanje zbog sušenja.



Slika 11. Odnos skupljanja uslijed sušenja i autogenog skupljanja pri malim vodocementnim omjerima [2]

Kod betona visoke čvrstoće gdje je, kako je već navedeno, izražena pojava samoisušivanja, odnosno autogeno skupljanje jako veliko, njegovanje u vodi ili vlaženje površine

neće spriječiti pražnjenje vode u kapilarama jer voda ne može prodrijeti u beton niske propusnosti [15]. Rješenje ovog problema je unutarnje njegovanje koje se temelji na primjeni prethodno natopljenog lakog agregata ili nekog drugog poroznog materijala koji konzervira vodu unutar smjese sprječavajući smanjenje relativne vlažnosti [16].

Dakle, dvije osnovne komponente ukupnog skupljanja su autogeno skupljanje i skupljanje uslijed sušenja. Slika 11. pokazuje da pri vodocementnom omjeru od 0,4, autogeno skupljanje iznosi 40 % od magnitude ukupnog skupljanja, dok je kod vodocementnog omjera od 0,23 ono 80 %. Razumljivo je da autogeno skupljanje ne može biti izbjegnuto, ali se u većini slučajeva pretpostavlja da je toliko malo da se može smatrati

beznačajnim, posebno kod betona uobičajene čvrstoće s v/c omjerom većim od 0,45. Međutim, kod betona visoke čvrstoće s jako malim vodocementnim omjerima (v/c < 0,40) autogeno je skupljanje značajan dio cjelokupnog skupljanja [2].

Skupljanje betona visoke čvrstoće uslijed sušenja je znatno manje nego betona uobičajene čvrstoće jer je mali vodocementni omjer i mala je propusnost. Skupljanje uslijed sušenja ovisi i o debljini elementa, finoći mliva veziva kao i uvjeta okoline (temperaturi i vlažnosti okoline).

Danas nije u dosta slučajeva poznat točan odnos tih dviju vrsta skupljanja, autogenog skupljanja i skupljanja uslijed sušenja, u okviru veličine ukupnog skupljanja, posebno u ranoj starosti i kod betona visokih čvrstoća i betona visokih performansi.

LITERATURA

- [1] Comité Euro-International du Béton: *SERVICEABILITY MODELS: Behavior and modelling in serviceability limit states including repeated and sustained loads*, CEB Bulletin d'Information N° 235, Progres report, pp. 57-68, 1997.
- [2] Holt, E.: *Early age autogenous shrinkage of concrete*, VTT Building and Transport, Technical research centre of Finland, ESPOO, pp. 22-47, 2001.
- [3] Tazawa, E.: *Autogenous Shrinkage of Concrete*, *Proceedings of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute)*, E&FN Spon, London, Hiroshima, pp. 411, 1998.
- [4] Muravljov, M.: *Građevinski materijali*, Građevinska knjiga, Beograd, 2007.
- [5] Ukrainczyk, V.: *Beton - Struktura, Svojstva, Tehnologija*, udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 147-154, 259-264, 1994.
- [6] Šahinagić-Isović, M.: *Influence of steel fiber reinforcement to the behavior of reinforced concrete beams*, University "St. Cyril and Methodius" of Skopje, Civil Engineering faculty, Doctoral thesis, pp. 38-59, 2010.
- [7] Saje, D.: *Krčenje betonov visoke trdnosti v prvih dneh po vgraditvi*, 12. slovenski kolokvij o betonih – Nosivosti pri gradnji tlakov, Ljubljana, 2005.
- [8] Van Breugel, M.: *Additional Remarks on the Risk of Cracking in Hardening Concrete*, *Proceedings of Rilem International Conference on Concrete at Early Ages*, Paris, Vol. 2, (1982.), pp. 103-108
- [9] Le Roy, R., De Larrard, F.: *Creep and shrinkage of high-performance concrete. Proceedings of the 5th International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Barcelona, Spain, 6-9 September 1993, pp. 499-504
- [10] Aguado, A., Gettu, R.: *Creep and Shrinkage of High-Performance Concrete*, *Proceedings of the 5th International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Barcelona, Spain, 6-9 September 1993, pp. 481-492
- [11] Koh, K., Ryu, G., Kang, S., Park, J., Kim, S.: *Shrinkage Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)*, *Advanced Science Letters*, Volume 4, Number 3, (2011.), pp. 948-952
- [12] Aslani F., Nejadi S.: *Shrinkage behavior of self-compacting concrete*, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, Vol.13(6), (2012.), pp. 407-419
- [13] Sakata, K., Shimomura, T.: *Recent progress in research on and code evaluation of concrete creep and shrinkage in Japan*, *Journal of Advanced Concrete Technology* 2, (2004.) 2, pp. 133-140
- [14] Sicard, V., Pons, G.: *High-Performance Concrete: Some Phenomena in Relation to Desiccation*, *Materials and Structures*, Vol.25, (1992.), pp. 591-597
- [15] Zhutovsky, S., Kovler, K., Bentur, A.: *Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes*, *Cement and Concrete Research*, Vol.41, (2011.), pp. 981-986
- [16] Zhutovsky, S., Kovler, K., Bentur, A.: *Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete*, *Cement & Concrete Composites*, Vol.26, (2006.), pp. 499-507