

UDK: 627.824/627.824.05  
Originalni naučni rad

## PRIMENA VALJANOG BETONA U IZGRADNJI BRANA IV DEO – GRAĐENJE, KONTROLA KVALITETA I EKONOMSKI ASPEKTI

Vladan KUZMANOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ, Bojan MILOVANOVIC  
Građevinski fakultet, Beograd

### REZIME

Poslednji iz serije od četiri rada posvećenih valjanom betonu odnosi se na građenje, kontrolu kvaliteta i ekonomske aspekte RCC brana. U prvom delu rada obrađena su najvažnija pitanja tehnološkog procesa izgradnje ovog tipa brana, kao što su: spravljanje betona, transport, razastiranje, zbijanje, obrada horizontalnih spojnica, galerije i drenaže, nega i zaštita. Zatim su opisana laboratorijska ispitivanja i terenska merenja u cilju kontrole kvaliteta RCC-a i date preporuke na bazi istraživanja izvršenih u ACI i USACE. U poslednjem poglavlju analizirani su ekonomski aspekti, moguće uštede, struktura i postupak određivanja jedinične cene valjanog betona.

**Ključne reči:** brane, RCC, transport, ugrađivanje, horizontalne spojnice, kontrola kvaliteta, jedinična cena.

### 1. GRAĐENJE BRANA OD VALJANOG BETONA

Planiranje, organizacija rada i mehanizacija za izgradnju brana od valjanog betona znatno se razlikuju u odnosu na klasične gravitacione betonske brane. Umesto građenja "u vertikalnom pravcu" nekom od metoda blokova, ugrađivanje RCC-a se vrši u relativno tankim horizontalnim slojevima, po čitavoj horizontalnoj površini brane. Zbog toga je veoma važno da materijali, pristupni putevi, temelji i obrada površine slojeva budu blagovremeno isplanirani i pripremljeni.

Imajući u vidu znatno veće dnevne učinke, proizvodnja i skladištenje agregata i položaj fabrike betona kod brana od valjanog betona su još značajnija pitanja nego kod klasičnih gravitacionih betonskih brana. Obično se zahteva priprema velike deponije agregata koja zadovoljava bar polovinu ukupnih potreba za agregatom u toku jedne sezone. Razlozi su sledeći:

- smanjenje kapaciteta fabrike agregata, jer se obezbeđenjem dovoljne količine agregata pre početka izgradnje, može smanjiti kapacitet fabrike agregata u odnosu na slučaj kada nema velike deponije;

- planirana proizvodnja hladnog agregata u toku zime, omogućava efekat prethodnog hlađenja mešavine;
- dinamički plan izgradnje i/ili realizacije finansijskih sredstava.

Položaj i veličina deponije agregata moraju biti usklađeni sa položajem fabrike betona i načinom transporta agregata kako bi se izbegli segregacija i promenljivost granulometrijskog sastava. Ovo je posebno važno ako su planirani dnevni učinci veliki, pa se posebno mora voditi računa o dužini transporta, usponima i nagibima, povratnim putevima, i sl. Na taj način proizvodnja agregata i snabdevanje fabrike betona biće brzi, efikasni i pouzdani.

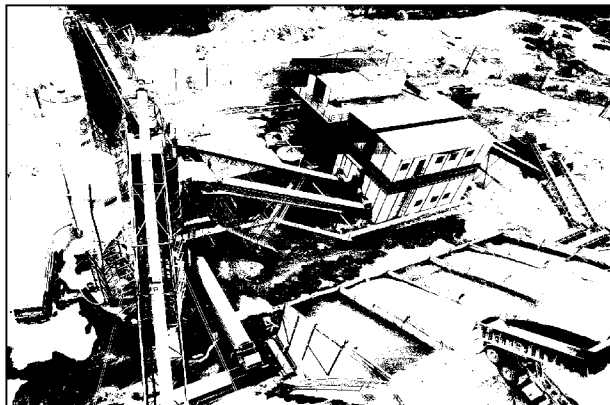
Položaj fabrike betona bira se tako da ukupna dužina transporta (horizontalni i vertikalni) i izloženost sveže mešavine uticaju atmosferilija budu minimalni. Ako se za transport koriste kamioni, fabrika betona treba da bude na uzvišenju, kako se voda od padavina i pranja točkova transportnih sredstava ne bi slivala na prostor fabrike. Zbog toga se preporučuje da fabrika betona bude smeštena u budućoj akumulaciji, neposredno uzvodno od profila brane, ili iznad kote krune predbrane.

Da bi se što potpunije opisalo građenje RCC brana, u ovom poglavlju biće prikazan veći broj fotografija karakterističnih za pojedine faze proizvodnje valjanog betona, transporta i ugrađivanja mešavine i zanimljivih detalja konstrukcije. Fotografije brane Platanovrissy (Grčka, 1997., visina 95 m) snimili su lično autori, a ostale fotografije su zbog kvaliteta preuzete iz lit. [8], iako je veliki broj izvorno prikazan u nekim drugim člancima.

#### 1.1. Spravljanje valjanog betona

Koncept valjanog betona potpuno je promenio klasičan sistem proizvodnje i ugrađivanja betona kod gravitacionih brana. Povećanje proizvodnih kapaciteta

može se postići upotrebom većih mešalica sa cikličnim radom (uz eventualno povećanje njihovog broja), ili upotrebom mešalica sa kontinualnim radom.



Slika 1. Fabrika betona na brani Platanovrissy

Usvojene mešalice treba da omoguće odgovarajuće mešanje komponenata i kapacitet koji odgovara maksimalnoj planiranoj dnevnoj proizvodnji. Rad mora biti bez zastoja, a održavanje brzo i efikasno. Zbog toga se zahtevaju robusne mešalice koje mogu ispuniti tražene uslove. Na slici 1. prikazana je fabrika betona na brani Platanovrissy sa mikserima kontinualnog dejstva.

Prilikom spravljanja valjanog betona, najčešće neželjene pojave su segregacija i varijacije vlažnosti. Segregacija se može javiti pri spravljanju, pri transportu ili pri razastiranju betonske mešavine (slika 2.). Zbog toga tretman agregata mora da bude strogo kontrolisan u svakoj fazi proizvodnje i ugrađivanja.



Slika 2. Pojava segregacije

Varijacija vlažnosti posebno je izražena u početnim mešavinama. Obično se precenjuje vlažnost agregata i

dobija se manje vode nego što je potrebno da bi se dobila mešavina odgovarajuće konsistencije. Ako se ima u vidu da se te mešavine nanose na prethodno izveden sloj koji je počeo da vezuje (horizontalne spojnice), problem dodatno dobija na značaju zbog nedovoljne veze prethodnog i narednog sloja. Zbog toga je bolje u prvim slojevima početi sa mešavinama nešto veće vlažnosti, a zatim količinu vode smanjivati dok se ne postigne tražena konsistencija.

Da bi se dobila mešavina projektovanog kvaliteta, mora se vršiti precizna i stalna kontrola doziranja količine cementa i pucolana. To je posebno važno kod "posnijih" mešavina i kada je količina vezivnih materijala u silosima manja. Zato se mora održavati dovoljna količina materijala redovnim dopunjavanjem silosa i koristiti odgovarajući dozator sa perajama.

## 1.2. Transport i razastiranje

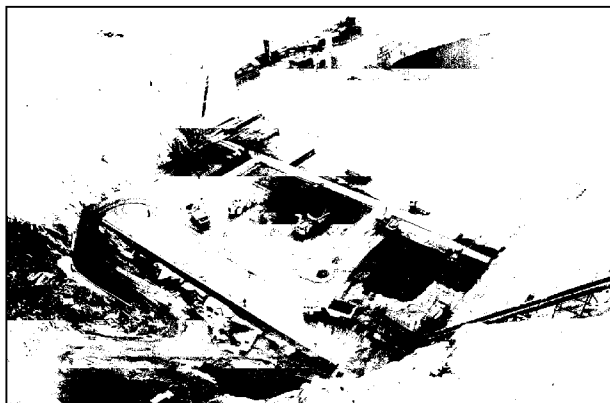
Izbor načina i postupka *transporta* betonske mešavine od fabrike do pregradnog profila prvenstveno zavisi od sledećih uslova:

- količine valjanog betona koju treba ugraditi;
- pristupa do pregradnog profila;
- raspoložive opreme;
- nabavne cene nove opreme.

Generalno, postoje tri načina transporta mešavine RCC-a: cikličan, kontinualan i kombinovan. Izbor zavisi i od tipa mešalica u fabrici betona, ali pravilnom kontrolom moguće je kombinovati cikličan način spravljanja betona i kontinualan način transporta mešavine i obrnuto.

Na izbor transportnog sistema utiče i zahtevani kvalitet površine slojeva. Po pravilu se za visoko-kvalitetne površine slojeva sa višim zahtevanim čvrstoćama usvaja kontinualni sistem transportera. U suprotnom, češće se koristi transport kamionima ili damperima. Pri tome posebnu pažnju treba posvetiti merama za sprečavanje prljanja površine slojeva.

Kombinovani sistem, sa transporterima od fabrike betona do pregradnog profila i vozilima na samoj površini brane, uspešno je primenjen na mnogim gradilištima, kao što je to prikazano na slici 3. (brana Platanovrissy, debljina slojeva 30 cm). Na taj način koriste se prednosti jeftinog kontinualnog transporta, pri čemu nema kontaminacije površine slojeva. Nedostatak kombinovanog sistema može biti upotreba pretovarnih bunkera i moguća segregacija u njima.



Slika 3. Transport mešavine na brani Platanovrissy

Iskustva pokazuju da pri izboru transportnog sistema treba voditi računa i o maksimalnom zrnu agregata ( $D_{max}$ ). Pri tome, ako se koriste obični kamioni: za  $D_{max} < 40$  mm nema opasnosti od segregacije; za  $D_{max} < 80$  mm moraju se preduzeti mere za sprečavanje segregacije; za  $D_{max} > 80$  mm ne preporučuje se transport običnim kamionima.

**Razastiranje** se vrši u slojevima debljine od 15 do 100 cm, mada se slojevi debljine preko 60 cm ređe koriste. Debljina može varirati u zavisnosti od proporcija mešavine, kapaciteta fabrike betona i sistema transporta, načina razastiranja i zbijanja, upotrebe vezivnog maltera i veličine radne površine. Za većinu slučajeva, preporučuje se početna debljina od 30 cm, sa kasnijim podešavanjem u zavisnosti od rezultata ispitivanja. Na slici 4. prikazano je razastiranje i zbijanje mešavine na brani Platanovrissy.



Slika 4. Razastiranje mešavine na brani Platanovrissy

Kada je debljina slojeva do 30 cm, za razastiranje se mogu koristiti mali dozeri, međutim bolji rezultati

postizani su kombinovanjem dozera različitih veličina. Uobičajeno je da se slojevi razastiru u pravcu ose brane, od obale do obale, počevši od uzvodne pa prema nizvodnoj konturi. Razastiranjem treba postići ujednačenu površinu pošto se samo tako omogućava ujednačeno zbijanje slojeva.

Po pravilu, zabranjeno je kretanje mehanizacije po već zbijenoj površini RCC-a (jer se može oštetiti površina sloja). Ukoliko je to neizbežno, neophodno je zaštititi spojnicu (npr. rashodovanim trakama transportera). Na slici 4. mogu se uočiti ova oštećenja.

Za kontrolu površine slojeva i nagiba kontura većina izvođača danas koristi rotirajuće laserske uređaje. Prijemnici se montiraju na ivicama noževa buldozera i tako se postiže precizna kontrola razastiranja. Prilikom razastiranja mnogo je važnije za što kraće vreme postići ujednačenu površinu sloja, nego trošiti vreme na finalnu obradu slojeva, rizikujući da prethodni sloj počne da vezuje pre završetka zbijanja narednog sloja. U slučaju kada su slojevi deblji od 30 cm, dozerima se osim razastiranja vrši i "remiksovanje" i "redistribucija" mešavine kao i veći deo zbijanja, čime se segregacija eliminiše, ili umanjuje na dozvoljenu meru. Ova tehnologija ispitana je na probnim poljima u velikoj razmeri i potvrđena na konkretnim RCC branama.

U poslednje vreme počela je da se razvija "Sloping layer" metoda koja se zasniva na razastiranju većeg broja slojeva (*layers*) od po 20 do 30 cm u nagibu od 1:10 do 1:20, sve dok se ne dostigne debljina sloja (*lifts*) od 2 do 4 m koji se zbjija. Slojevi se rade u pravcu od uzvodne ka nizvodnoj konturi, pomerajući front rada duž ose brane, od jedne ka drugoj obali. Imajući u vidu način izvođenja, ovaj postupak može se nazvati "metoda višestrukih kosih slojeva". Cilj je da se skрати vreme izloženosti površine svežeg RCC-a pre nanošenja novog kosog sloja. Povezivanje očvršle površine višestrukih (visokih) slojeva vrši se cementnim malterom.

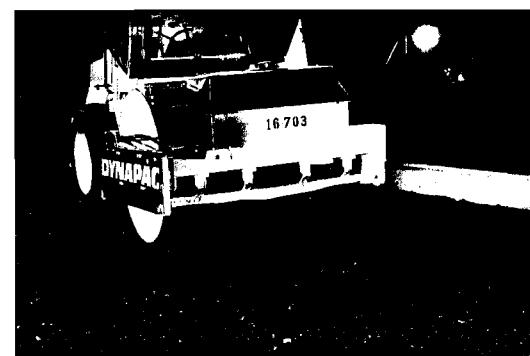
### 1.3. Zbijanje

Da bi se postiglo predviđeno zbijanje valjanog betona, najpre je potrebno izvršiti odgovarajući izbor valjaka, koji omogućavaju zbijanje željene zapremine RCC-a u jedinici vremena. Parametri koji se uzimaju u obzir su:

- pokretljivost;
- sila zbijanja;
- veličina valjka;
- frekvencija;
- amplituda;

- radna brzina i
- zahtevano održavanje.

Učinak valjka pre svega zavisi od njegove veličine i brzine. Pored ovoga, na izbor tipa valjka utiče i ukupna količina betona koju treba ugraditi, obradljivost mešavine, debljina slojeva, stepen konsolidacije i prostorno ograničenje. Valjci teži od 5 t obično ne mogu da vrše zbijanje na rastojanju manjem od cca 20 cm od vertikalne oplata, ili neke druge preperke. Zbog toga je potrebno predvideti manja, ručna sredstva, za zbijanje ovih površina slojeva. Najvažniji faktor za dobro zbijanje je dinamička sila, odnosno vibraciono dejstvo valjaka. Na slici 5. prikazano je razastiranje i zbijanje na brani Platanovrissy.



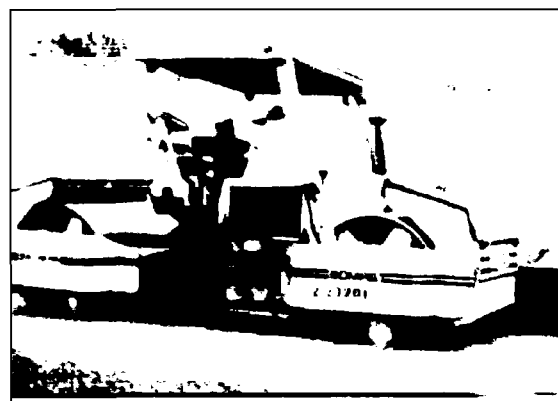
Slika 5. Brana Platanovrissy: sistem razastiranja i zbijanja

Puna zbijenost zavisi od projekta mešavine. Ako je sadržaj paste veći od minimalno potrebnog, ispred valjka će se pojaviti specifični talas. Ako je sadržaj paste jednak ili manji od zapremine potrebne da ispuni sve pore između zrna agregata, prilikom zbijanja dolazi do međusobnog kontakta zrna agregata i nema talasa ispred valjka. Na narednoj slici može se uočiti pojava specifičnog talasa ispred valjka usled prevelike vlažnosti mešavine i viška paste.

Zbijanje RCC-a treba izvršiti odmah nakon razastiranja, što je pre moguće, posebno ako je vreme toplo. Ako su temperature mešavine u granicama od 15 do 25 °C, obično se zahteva da se zbijanje završi u roku od 10 min od razastiranja i 40 min od spravljanja mešavine. Ova vremena se mogu povećati za mešavine sa aditivima koje imaju produženo vreme vezivanja.

Površina nakon razastiranja treba da bude glatka, bez neravnina, tako da valjci proizvode ravnomeran pritisak po čitavoj površini. Ako nezbijeni sloj svežeg RCC-a nije gladak, pri zbijanju, valjci će prekomerno zbiti

ispupčene delove površine, odnosno udubljene površine će biti nedovoljno zbijene.



Slika 6. Specifičan talas ispred valjka

Energija potrebna za zbijanje pomoću vibro-valjka može se odrediti prema sledećem izrazu:

$$E = \frac{2a \cdot L \cdot N \cdot f}{v \cdot B \cdot L} \cdot \left( W + \frac{F}{2} \right),$$

gde navedene oznake predstavljaju sledeće karakteristike vibro-valjka:

$E$  – "energija zbijanja" (kgcm/cm<sup>2</sup>);

$a$  – amplituda vibracija (cm);

$W$  – osovinski pritisak (kg);

$F$  – "centrifugalna sila" pobuđena motorom (kg);

$v$  – brzina kretanja (cm/min);

$L$  – radna širina bubnja (cm);

$B$  – širina kontakta bubnja i RCC-a (cm);

$f$  – frekvencija (broj obrt./min);

$N$  – broj prelazaka;

Svaka mešavina RCC-a pri zbijanju ima različito ponašanje, koje zavisi od temperature, vlažnosti, brzine vetra, plastičnosti finih čestica agregata, granulometrijske krive i maksimalnog zrna agregata. Generalno, mešavina treba da bude zbijena do ujednačene teksture i relativno glatke površine sloja. Materijal ne sme da se lepi za valjak, niti da se na površini sloja pojavljuje vlaga. Ove uslove treba neprekidno pratiti i ukoliko se uoče navedene pojave, potrebno je preduzeti odgovarajuće mere.

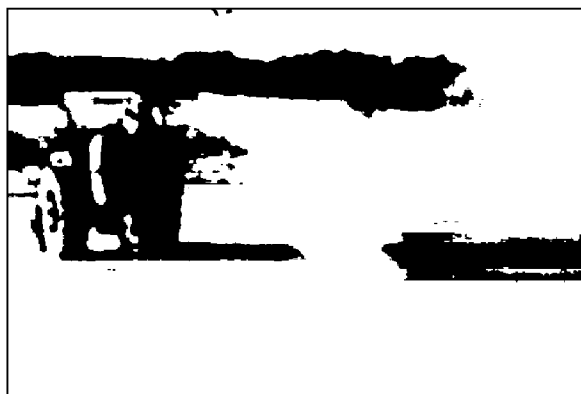
#### 1.4. Horizontalne spojnice

Horizontalne spojnice mogu biti planirane i neplanirane. Ako je vezivanje mešavine prethodnog sloja počelo pre njegovog pokrivanja narednim slojem valjanog betona, horizontalna površina na kontaktu slojeva naziva se *hladna spojnica*. Pokazatelj stanja hladne spojnice zove se *zrelost spojnice* i zavisi od prosečne temperature na površini sloja i vremena izloženosti. Na osnovu ovoga, zrelost spojnice izražava se u jedinicama stepen-čas. Pri tome treba naglasiti da li se radi o Celzijusovim ili Farnhajtovim stepenima. Spojnice su takođe osetljive na količinu i osobine cementa i uticaj usporivača vezivanja (ako je isti upotrebljen).

Iako je svaka mešavina i konkretna situacija različita, može se smatrati da će pri temperaturi od 20 °C hladna spojnica početi da se javlja približno posle 4 sata. Spojnica koja je bila otkrivena od 4 do 6 sati pre ugrađivanja narednog sloja imaće određenu smičuću čvrstoću, ali će vodopropustljivost biti velika, iako je

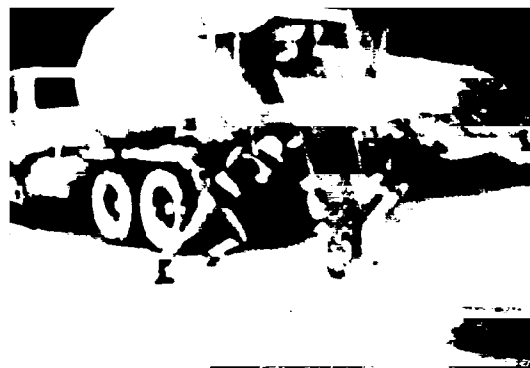
spojnica očišćena i obrađena slojem vezivnog maltera. Smatra se da je posle približno 600 °C·h neophodan tretman vezivnim malterom da bi se postigla smičuća ili zatežuća čvrstoća u posmatranoj spojnici. Neki projektanti smatraju da je posle 1 do 2 dana izloženosti površine sloja, obavezna upotreba vezivnog maltera, bez obzira na zrelost spojnice.

Obrada horizontalne površine sloja, odnosno spojnice valjanog betona, razlikuje se od obrade spojnice kod klasičnog masivnog hidrotehničkog betona po tome što nema vode na površini sloja za vreme vezivanja betona (na površini nema filma cementnog mleka i kod korektno projektovanih RCC mešavina neće se pojaviti izbijanje viška vode). Međutim, nije neobično da se kod dobro zbijenih mešavina pojavi pasta na površini. Ova pasta nije znak slabijeg kvaliteta i ne mora se uklanjati pre postavljanja novog sloja.



Slika 7. Nega spojnica na brani Salto Caxias

Kod brana visine nekoliko desetina metara, obično nije potrebna obrada spojnica pre razastiranja novog sloja, sve dok je stepen izloženosti površine manji od 1500 °C·h, pod uslovom da je površina održavana u čistom i vlažnom stanju (slika 7.). Na mnogim branama od valjanog betona, vezivni malter predstavlja klasičnu mešavinu sitnozrnog hidrotehničkog betona sa dodatim usporivačima vezivanja. Veličina maksimalnog zrna agregata najčešće se ograničava na 16 mm. Debljina vezivnog maltera zavisi od maksimalnog zrna agregata u njemu i treba da bude ujednačena po čitavoj površini sloja. Pravilna primena vezivnog maltera prikazana je na slici 8.



Slika 8. Primena vezivnog maltera za obradu hladne spojnice

#### 4.5. Oplata i obrada kosina brane

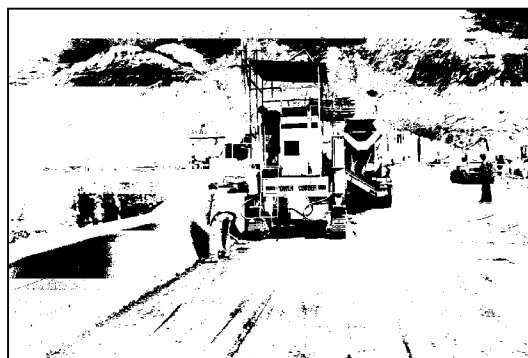
Površine RCC brana koje nisu horizontalne mogu se oblikovati isto kao kod klasičnih gravitacionih betonskih brana, ali je neophodno primeniti drugačije ankere i specifičan metod rada. Pri tome, uvek treba voditi računa o obezbeđivanju potrebne vodonepropustljivosti. Visina prepusta oplatae na kosim površinama brane sužava zonu dostupnu vibrovaljcima. Zbog toga visina oplatae mora biti ograničena i usklađena sa postupkom zbijanja. Malim valjcima moguće je prići na cca 2 cm do vertikalne oplatae. Da bi se obezbedilo dobro zbijanje na ovakvim površinama, potrebno je ograničiti veličinu maksimalnog zrna agregata, povećati sadržaj cementne paste u mešavini i uskladiti debljinu slojeva sa veličinom sredstava za zbijanje. I pored svih ovih mera, nakon zbijanja uvek ostaje mala zona nezbijenog RCC-a iznad površine sloja, uz samu oplatau.

Postavljanje i skidanje klasične oplatae u nekim slučajevima može postati kritična aktivnost u procesu izgradnje brane od valjanog betona. Ovo je posebno čest slučaj u zoni krune brane, gde je zapremina RCC-a jednog sloja mala i gde zone uz oplatau sa uzvodne i nizvodne strane čine relativno veliki deo širine fronta rada. Tada je više vremena potrebno za postavljanje i skidanje oplatae nego za razastiranje i zbijanje valjanog betona.

Obrada uzvodnog i nizvodnog lica RCC brane može se postići na nekoliko načina. Sledi kratak prikaz osnovnih osobina svakog od njih.

**Ivičnjaci** se izvode od klasičnog hidrotehničkog betona specijalnim mašinama sa klizajućom oplatom. Ovi konturni elementi visoki su obično 60 do 120 cm (slika

9), oblika usklađenog sa projektovanim nagibom konture. Ugrađivanje valjanog betona je direktno uz ivičnjake, u roku od 8 sati od betoniranja ivičnjaka. Iskustvo pokazuje da je simultanim betoniranjem ivičnjaka i RCC-a moguće napredovanje po visini brane od približno 50 cm na dan, pri čemu se ostavlja dovoljno vremena da ivičnjaci razviju potrebnu čvrstoću. Ovaj način se obično primenjuje kod brana većih dimenzija.



Slika 9. Uzvodna kontura na brani Platanovrissy

Nagibi kontura mogu se takođe izvesti i **prefabrikovanom betonskom oplatom** u vidu panela ili blokova. Paneli se sastoje od relativno tankih betonskih ploča od visokokvalitetnog hidrotehničkog betona sa osloncima za podizanje.

Istovremeno, paneli predstavljaju i izolaciju ili, u izuzetno hladnim područjima, deo sistema izolacije unutrašnjeg valjanog betona. Uz panele, sa zadnje strane, mogu se pričvrstiti teške, fleksibilne membrane kojima se obezbeđuje vodonepropustljivost. Na slici 10. prikazana je uzvodna kontura od prefabrikovanih panela na brani Urugua-i (Argentina, 1989., 76 m).



Slika 10. Uzvodna kontura od prefabrikovanih elemenata

Kontura može biti i od *nezbijenog valjanog betona*. U tom slučaju nagib konture jednak je prirodnom nagibu RCC-a (ugao unutrašnjeg trenja), iznosi od 40 do 50° i zavisi od oblika zrna agregata, granulometrijskog sastava i načina kontrole građenja.



Slika 11. Obrada uzvodne konture brane primenom klasične oplata

Mnoge brane izgrađene su primenom *tradicionalnog sistema oplata* kojim se formira vertikalna, stepenasta ili kosa kontura od valjanog betona. Ovaj sistem koristi se bilo kao oplata za klasičan beton, ili kao oplata uz koju se direktno ugrađuje RCC.

Na slici 11. prikazana je izgradnja vertikalne uzvodne konture od hidrotehničkog betona u klasičnoj oplati i ostvarivanje veze klasičnog i valjanog betona. U oba slučaja oplata mora da bude dobro ankerovana kako bi mogla da izdrži pritisak koji nastaje upotrebom vibratora kod klasičnog betona, ili valjaka kod RCC-a.

Ovo se postiže korišćenjem razupirača sa spoljašnje strane i/ili ankera koji se pričvršćuju u prethodni sloj

valjanog betona. Ponekad se ista oplata koristi tako što se najpre ugrađuje RCC, a zatim se povlači uzvodno i služi kao oplata za klasičan beton koji se ugrađuje na licu mesta između oplata i prethodno izvedenog valjanog betona. Na slici 12. je specijalno konstruisana mehanizacija za zbijanje pod uglom, a na slici 13. je panorama stepenaste nizvodne konture brane Platanovrissy.



Slika 12. Obrada nizvodne konture specijalizovanom mehanizacijom



Slika 13. Panorama stepenaste nizvodne konture brane Platanovrissy

## 1.6. Nega i zaštita

Posle završetka zbijanja sloja valjanog betona, slobodna površina se mora štititi i negovati kao klasičan beton. To znači da se mora održavati u vlažnom stanju, ili bar prekriti tako da se spreči gubitak vlage do ugrađivanja narednog sloja. Takođe, mora se zaštititi od uticaja visokih temperatura ili smrzavanja, sve dok ne dostigne odgovarajuću čvrstoću.

Ako za vreme ugrađivanja počne da pada sasvim slaba kiša, ugrađivanje se može nastaviti pod uslovom da mehanizacija ne nanosi blato na površinu RCC-a, ili da

zbog povećanja vlažnosti počne da se oštećuje prethodni sloj. Ukoliko se primete bilo kakva oštećenja, ili materijal počne da se lepi za valjke, ugrađivanje se mora odmah prekiuti. Kada se transport mešavine vrši trakama bez upotrebe mehanizacije na točkovima, ili sa neznatnim brojem ovih mašina, ugrađivanje se može nastaviti i kada je vlažnost povećana. U tom slučaju obično se postepeno i veoma malo smanji količina vode u mešavini i nastavi sa ugrađivanjem sve dok se eventualno ne pojave prva oštećenja površine usled prevelike vlažnosti. Tada se ugrađivanje momentalno obustavlja.

Ako kiša počne da pada odmah posle završetka ugrađivanja sloja RCC-a, nema opasnosti od oštećenja, jer je površina praktično vodonepropustljiva. U tom slučaju bitno je obezbediti da se mehanizacija ne kreće po površini sloja. Posle prestanka padavina, treba sačekati da se površina prirodno osuši i nastaviti ugrađivanje sledećeg sloja. Blago nagnuta površina je posebno pogodna jer obezbeđuje oticanje vode i ubrzava nastavak radova. Oštećenja se mogu javiti jedino ako je je kiša izuzetne jačine i tada se moraju preduzeti mere obrade spojnice pre razastiranja i zbijanja narednog sloja.

Za vreme izgradnje, deo već zbijene površine sloja koji se ugrađuje mora se stalno vlažiti, ali bez prisustva prekomerne količine vode na površini. Ako nema saobraćaja na površini, ili je zanemarljiv, mogu se koristiti folije kojima se prekriva površina sloja i time sprečava gubitak vlage. U protivnom, neophodno je prisustvo cisterni sa vodom 24 sata dnevno svih 7 dana u nedelji. Pri tome, cisterne moraju biti opremljene finim rasprskivačima kojima se voda pretvara u maglu i na taj način sprečava štetno ispiranje i neravnomerno vlaženje. Pored toga, moraju postojati i creva za ručno vlaženje površina koje nisu dostupne cisternama. Bitan uslov je da se vlaženje čitave površine sloja izvrši sa minimalnim brojem prelazaka kako bi se sprečila mehanička oštećenja.

Poslednji sloj RCC-a treba vlažiti bar 14 dana. Zaštita površine određenim smesama nije pogodna zbog neravnina, zbog verovatnih oštećenja usled daljeg građenja, zbog male početne vlage u mešavini i otežanog odavanja toplote.

Zbog malih vrednosti modula elastičnosti valjanog betona u ranim fazama i znatnog tečenja, termičke prsline obično nisu naročit problem, izuzev kod brana velikih visina. Ukoliko se brana gradi u oblastima sa izrazito niskim i/ili visokim temperaturama i

iznenadnim velikim temperaturnim promenama, obavezno se moraju predvideti mere zaštite horizontalnih spojnica. U protivnom, moguće je da zbog pada temperature dođe do pojave termičkih napona zatezanja i prslina.

Toplota hidratacije RCC-a i brzina napredovanja narednih slojeva omogućava da se građenje ne prekida ni po veoma hladnom vremenu. Može se čak dogoditi da je spoljašnja temperatura vazduha manja od nule, ali da je na površini sloja temperatura pozitivna sve dok se ne razastre i ugradi naredni sloj.

### 1.7. Galerije i drenaže

U dosadašnjoj praksi izgradnje brana od valjanog betona ustanovljeno je više različitih postupaka izvođenja *galerija* u telu brane i to:

- 1) od klasičnog betona sa kliznom oplatom;
- 2) od prefabrikovanih armirano-betonskih elemenata;
- 3) od RCC-a uz klasičnu oplatu;
- 4) od RCC-a sa šljunčanom ispunom.

Postupci sa oblogom galerije od klasičnog betona ili prefabrikovanih elemenata donekle remete koncepciju građenja brana od valjanog betona jer sužavaju front rada i zahtevaju naizmeničnu ugradnju klasičnog i valjanog betona. Na taj način se poskupljuje cena građenja, a napredovanje u zoni galerija usporava. Kod obloge od klasičnog betona, da bi se nastavili radovi bez odlaganja, svod galerije mora se podupirati, tako da može da izdrži pritisak valjaka kojima se vrši zbijanje narednih slojeva. Ako je obloga od prefabrikovanih elemenata, nije moguće osmatranje prslina.

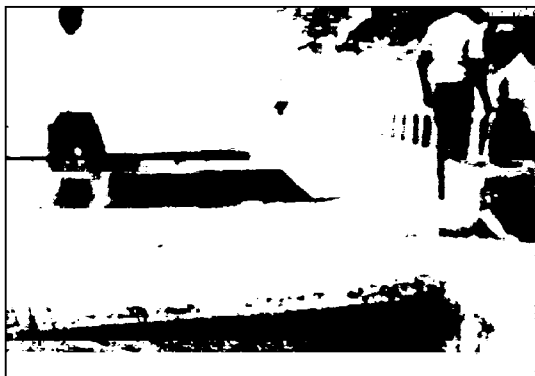
Na slici 14. prikazano je izvođenje galerije od prefabrikovanih armirano-betonskih elemenata i njen izgled po završetku, sa karakterističnim detaljom prefabrikovanog elementa za plafon (svod) galerije.

Rešenje sa valjanom betonom uz klasičnu oplatu je povoljnije od prethodnih zato što bolje koristi prednosti metode ugrađivanja mehanizacijom za nasute brane. Jeftinije je i omogućava veće učinke, ali zahteva strožije uslove ugrađivanja RCC-a uz oplatu u zoni galerije.

Posebno je zanimljiv postupak izgradnje galerija ugrađivanjem privremene šljunčane ispune (bez vezivnih materijala) u delovima slojeva koji se nalaze u zoni galerije uz kasniji iskop šljunka. Na ovaj način se omogućava praktično nesmetano izvođenje slojeva valjanog betona. Međutim, uklanjanje (iskop) privremene šljunčane ispune kasnije često izaziva



probleme zbog otežanog pristupa mehanizacije. Takođe, obično je velika hrapavost zidova i svoda galerije i nedovoljno precizna geometrija poprečnog preseka. Da bi se ovi nedostaci sprečili, moguće je ugrađivanje



drvenih ili metalnih "razdelnika" između RCC-a i šljunčane ispune, ili ugrađivanje valjanog betona u zoni konture galerije i iskop pre nego što previše očvrstne.



Slika 14. Galerija od prefabrikovanih elemenata

Na slici 15. vidi se izgradnja galerije sa privremenom šljunčanom ispunom. Na jednom delu galerija ima nišu prema nizvodnoj konturi. Sa uzvodne strane uočava se obloga od prefabrikovanih betonskih elemenata kojom je formirano uzvodno lice brane.

**Drenaže** služe za smanjenje filtracionog pritiska i sakupljanje procednih voda u telu brane i temeljnoj spojnici. Ovo se može postići šljunčanim drenažama, poroznim betonom, perforiranim drenažnim cevima i drenažnim galerijama. Takođe, mogu se izvesti i drenažne bušotine sa površine sloja, odnosno od planiranih radnih spojnica do galerija, ili iz galerija kroz RCC. Bušenje počinje ubrzo posle zbijanja sloja valjanog betona i obično se izvodi udarnim bušilicama.

Kod novijih brana drenaža u telu brane izvedena je pomoću vertikalnih bušotina smeštenih u blizini uzvodnog lica. Prečnik bušotina je obično od 73 do 102 mm. Bušotine počinju od površine sloja koji je na koti maksimalnog uspora i završavaju se u galeriji u zoni dna akumulacije. Na taj način kod brana manje visine u telu brane postoji samo jedna galerija koja je istovremeno i injekciona i drenažna.

### 1.8. Predbrane

Valjani beton može se uspešno primeniti i pri izgradnji uzvodne i/ili nizvodne predbrane, kojima se temeljna jama štiti od plavljenja u toku izgradnje glavne brane. Postoji više primera kod kojih su predbrane bile veoma ozbiljne RCC konstrukcije, visoke više desetina metara:

- Sir (Turska, 1987., h = 40 m, L = 105 m,  $V_{RCC-a} = 40.000 \text{ m}^3$ );
- Yantan (Kina, 1988., h = 53 m, L = 372 m,  $V_{RCC-a} = 165.000 \text{ m}^3$ );
- Yantan (Kina, 1988, h = 40 m, L = 320 m,  $V_{RCC-a} = 110.000 \text{ m}^3$ );
- Geheyan (Kina, 1988, h = 40 m, L = 170 m,  $V_{RCC-a} = 136.000 \text{ m}^3$ );
- Dongfeng (Kina, 1988., h = 29 m, L = 90 m,  $V_{RCC-a} = 20.000 \text{ m}^3$ ).



Slika 15. Galerija od RCC-a sa šljunčanom ispunom

Posebna pogodnost je ukoliko se izgradnja predbrane iskoristi kao probno polje na kome se u velikoj razmeri isproba fabrika betona, potvrdi usvojena receptura mešavine (uz eventualne korekcije), urade potrebna ispitivanja i merenja, uhoda sistem transporta,

razastiranja i zbijanja mešavine i time omogući uspešan početak izgradnje brane.

Iako je način građenja brana od valjanog betona (zasnovan na razastiranju mešavine krute konsistencije i zbijanju vibro-valjcima) potpuno drugačiji od gravitacionih betonskih brana od klasičnog betona, osnovne pretpostavke i principi projektovanja su veoma slični. Ovakav pristup omogućen je samom idejom valjanog betona, a to je da se bez obzira na razlike u mešavini i načinu ugrađivanja dobiju brane istih osobina, kvaliteta i trajnosti kao od klasičnog hidrotehničkog betona.

## 2. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I TERENSKA MERENJA

Osnovna razlika u kontroli ugrađenog valjanog betona u odnosu na klasičan beton proističe iz tehnologije građenja i kratkog vremena između ugradnje dva uzastopna sloja.

Da bi ugrađeni beton bio odgovarajućeg kvaliteta, potrebno je ispuniti propisane uslove kvaliteta materijala, mešavine i postupka ugrađivanja. To znači da agregat mora biti odgovarajućeg granulometrijskog sastava, da vezivni materijali omogućće postizanje zahtevane čvrstoće, da mešavina ima predviđene osobine, da sadržaj vode bude u propisanim granicama i da transport, razastiranje i zbijanje strogo slede usvojenu proceduru ugrađivanja. Jedino na taj način dobiće se valjani beton zahtevanog kvaliteta.

U postupku kontrole moraju svakodnevno učestvovati posebno obučeni stručnjaci, koji će nadgledati proizvodnju i ugrađivanje RCC-a, a naročito *količinu vode i stepen zbijenosti*. Određivanje vlage i zapreminske težine vrši se obično densitometrom. Ako je nakon završenog postupka zbijanja zapreminska težina nedovoljna, a mešavina još uvek sveža, dodatnim valjanjem se povećava zbijenost, odnosno zapreminska težina. Ako je mešavina počela da očvršćava, ili je previše kruta da bi se dodatnim valjanjem povećala zapreminska težina, sloj se mora ukloniti. U tom slučaju, da bi se smanjili troškovi i vreme, uklanjanje sloja treba izvršiti što pre.

Važan deo programa kontrole kvaliteta predstavljaju *specijalistički kursevi* za obuku radnika, rukovodećeg kadra i nadzorne službe. Na njima se posebno mora istaći razlika između klasičnog betona, RCC-a i nasutih brana. Takođe, treba objasniti vremensko ograničenje

od trenutka početka mešanja do završetka ugrađivanja, problem segregacije, značaj kvaliteta horizontalnih spojnica i nege valjanog betona.

### 2.1. Agregat

Veliki dnevni učinci i brz tempo građenja brana od valjanog betona zahtevaju značajne rezerve agregata pre početka građenja. Ovo je bitna pogodnost i sa stanovišta kontrole kvaliteta agregata, jer u toku proizvodnje agregata ima dovoljno vremena za njegovo ispitivanje. Agregat koji ne zadovolji propisane uslove kvaliteta, (po pravilu na početku proizvodnje, dok se ne izvrše sva podešavanja) može se iskoristiti za nasipanje površine deponije.

Ako se kasnije u toku proizvodnje dogodi da se kraće vreme proizvodi agregat neodgovarajućeg kvaliteta (relativno mala količina agregata), kod velikih deponija moguće je izvršiti njegovo rasipanje po deponiji, tako da se mešanjem kasnije dobije agregat propisanih osobina. U protivnom, ovakav agregat se mora transportovati van deponije i može se iskoristiti za nasipanje pristupnih puteva, platoa i sl. Otklanjanje uzroka pada kvaliteta i podešavanje rada fabrike agregata mora se uraditi čim je pojava uočena.

Prednosti velikih deponija agregata su i bolja ujednačenost temperature i vlažnosti agregata unutar deponije, što omoguććava bolju kontrolu mešavine. Ovo se posebno odnosi na deponije smeštene u tunelima vodozahvata, temeljnog ispusta itd. Iako je valjani beton, po pravilu, manje osetljiv na varijacije u granulometrijskom sastavu od klasičnog betona, posebnu pažnju treba obratiti ako se za proizvodnju koristi agregat sa površine deponije.

### 2.2. Kontrola sadržaja vlage

Kontrola sadržaja vlage u mešavini vrši se najpre u fabrici betona prilikom proizvodnje mešavine, a zatim i od strane nadzornog organa za vreme ugrađivanja. Da bi se obezbedila neprekidna komunikacija i mogućnost trenutne korekcije sadržaja vlage, mora postojati stalna (radio) veza između nadzornog organa i fabrike betona. Sve korekcije količine vode u mešavini u zavisnosti od sadržaja vlage u agregatu i ukupna količina vode moraju se redovno beležiti.

Vizuelno osmatranje zbijanja proverava se in-situ ispitivanjima vlage i zapreminske težine pomoću densitometara koje se po pravilu vrši svakoga sata.

Sadržaj vlage se povremeno kontroliše i na uzorcima u laboratoriji, ali se ne može uspostaviti direktna korelacija sa in-situ ispitivanjem. Zbog toga je korisno voditi kontrolne dijagrame koji pokazuju sadržaj vlage za svako ispitivanje, standardnu devijaciju i srednju vrednost (npr. na svakih 50 ispitivanja). Optimalna količina vode u mešavini može se menjati iz dana u dan, pa čak i u toku istog dana, i zavisi od temperature, promene sadržaja finih čestica, vremena isporuke mešavine itd.

### 2.3. Ugradljivost i merenje konsistencije

Ugradljivost kod valjanog betona predstavlja *moгуćnost zbijanja*. Širom sveta napravljeni su brojni pokušaji (svi zasnovani na merenju konsistencije vibriranjem) da se ugradljivost izmeri, ali nijedan od njih nije moguće primeniti na sve tipove RCC-a. Razlog tome je što neki valjani betoni imaju sleganje slično klasičnom betonu, dok su neki tako krute konsistencije da nema sleganja mešavine čak ni pri dugotrajnom vibriranju.

Vreme vibriranja potrebno za punu konsolidaciju uzorka se smanjuje sa upotrebom većih opterećenja. Povećanje opterećenja je ograničeno ukupnom težinom tega za datu Vebe aparaturu i karakteristikama vibro-ploče. Istraživanja u SAD, [7], dala su različite rezultate. Zajedničko za većinu njih je sledeće:

- standardna Vebe aparatura može se koristiti za ispitivanje konsistencije mešavina čije zbijanje do pune konsolidacije traje do 30 s;
- ako je krutost mešavine veća, mora se koristiti modifikovana aparatura i/ili teži teg;
- mešavine kod kojih je potrebno vreme vibriranja veće od 60 s nemaju dovoljno cementne paste koja bi popunila sve šupljine na površini;
- standardna devijacija rezultata merenja zapreminske težine direktno zavisi od krutosti mešavine.

Ako je postignuto potpuno zbijanje mešavine i ako je količina cementne paste dovoljna, obično se na površini RCC-a uočava sasvim malo cementne paste koja popunjava šupljine između zrna agregata. Vreme potrebno da se ovo ostvari je pokazatelj *obradljivost mešavine*.

Prema našim standardima, konsistenciju treba ispitivati u skladu sa JUS U.M8.054, modifikovanim Vebe testom. Očekivane vrednosti vremena vibriranja su od 15 do 30 s.

### 2.4. Kontrola čvrstoće na pritisak

Čvrstoća na pritisak ispituje se na standardnim uzorcima oblika kocke ivice 20 cm i izražava se u MPa. U postupku prethodnih laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja u toku izrade probnog polja, potrebno je odrediti čvrstoću posle 7, 28, 60, 90 i 365 dana. Spravljanje i nega uzoraka mora biti prema *Pravilniku o tehničkim normativima za beton i armirani beton*. U toku građenja, čvrstoću na pritisak treba ispitivati pri starosti betona od 90 i 365 dana i to na uzorcima spravljenim u fabrici betona i izvađenim iz tela brane. Kontrolu vršiti prema JUS U.M1.051.

Pri izradi uzoraka od mešavine RCC-a čija je konsistencija takva da se sleganje može izmeriti dovoljno je dugotrajno vibriranje kalupa (nekoliko minuta). Međutim ukoliko je u pitanju *no slump* konsistencija, neophodno je dodatno opterećenje uzorka. Pri tome treba odrediti korelaciju između postupka zbijanja mešavine u laboratorijskom uzorku i prilikom ugrađivanja betona valjcima na gradilištu.

Nedovoljna čvrstoća na pritisak može biti posledica različitih uticaja:

- višak ili manjak vlage u mešavini;
- nedovoljan broj prelazaka valjcima;
- neodgovarajuća amplituda ili frekvencija zbijanja;
- vreme proteklo od proizvodnje do završetka zbijanja;
- neodgovarajući granulometrijski sastav agregata;
- segregacija mešavine;

Bez obzira na uzrok, nedovoljna čvrstoća na pritisak se ispitivanjem mora otkriti u najkraćem roku i moraju se preduzeti mere za korekciju sastava mešavine ili postupka ugrađivanja. Zbog toga se vađenje cilindričnih uzoraka iz tela brane i njihovo ispitivanje nije dovoljno za kontrolu kvaliteta valjanog betona *u toku građenja*.

### 2.5. Učestalost kontrolnih merenja

Učestalost kontrolnih merenja treba da bude prema odredbama odgovarajućih JUS standarda. Međutim, s obzirom da se oni odnose na kontrolu klasičnih betona i maltera, ovde će se dati preporuke koje proističu iz istraživanja ACI, [7] i USACE, [12].

Tabela 1. Učestalost kontrolnih merenja prema ACI

Vrsta kontrolnog merenja	Učestalost
Sadržaj krupnog agregata u mešavini	jednom dnevno, ili na svakih 2300 m <sup>3</sup>
Sadržaj finih čestica agregata u mešavini	jednom dnevno, ili na svakih 2300 m <sup>3</sup>
Zapreminska težina agregata	jednom nedeljno
Kvalitet cementa	jednom mesečno
Zapreminska težina betona	na svakih 800 m <sup>3</sup>
Sadržaj vlage u agregatu	na svakih 2300 m <sup>3</sup>
Temperatura vazduha	jedan do dva puta u smeni
Konsistencija	dva do tri puta u smeni
Čvrstoća na pritisak (28, 90 i 365 dana)	jednom u smeni

Ova ispitivanja odnose se na laboratorijske uzorke spravljene za potrebe kontrole kvaliteta betona i njegovih komponenta. Rezultati kontrolnih ispitivanja moraju da budu u skladu sa uslovima kvaliteta betona definisanim u projektu i rezultatima ispitivanja na probnom polju.

Kontrolnim ispitivanjima treba obuhvatiti i uzorke "izvađene" iz tela brane (kernove). Učestalost vađenja kernova je jedan uzorak na svakih 1000 m<sup>3</sup> ugrađenog valjanog betona, a program ispitivanja treba da bude definisan projektom tehnološkog procesa izgradnje brane od RCC-a, [13]. Ispitivanja se vrše pri starosti od 365 dana.

### 3. EKONOMSKI ASPEKTI

Da bi se što potpunije iskoristile prednosti valjanog betona i snizila cena RCC brana, izvršeno je prilagođavanje konstrukcije gravitacionih betonskih brana ovoj metodi građenja. Osnovne prednosti valjanog betona u odnosu na klasičan su:

- 1) niža jedinična cena;
- 2) veći dnevni učinci i kraće vreme građenja konstrukcije;
- 3) uštede u ceni oplate, jer je ugrađivanje u slojevima, umesto u blokovima.

Uštede pri građenju neke brane od valjanog betona zavise i od mogućnosti da projektanti i graditelji primene osnovne principe RCC tehnologije. U cilju boljeg prikaza, posebno će se razmotriti činioci koji utiču na nižu cenu građenja brana od valjanog betona.

Istraživanja pokazuju da cena RCC-a može da varira u širokom rasponu u zavisnosti od karakteristika i vrste. Valjani betoni sa više cementa, kao i oni koji po svojim osobinama više podsećaju na klasičan beton, mogu dostići 85 % cene klasičnog hidrotehničkog betona.

*Cena agregata* predstavlja oko 40 % od ukupne cene RCC-a, uključujući i ugrađivanje. Zbog toga usvajanje vrste, granulometrijskog sastava, maksimalnog zrna agregata, i sl. predstavlja važna ekonomska pitanja. Cena agregata može značajno da varira, jer rečni agregat može biti i duplo jeftiniji od drobljenog. Međutim, često se primenom samo rečnog agregata ne može postići potreban granulometrijski sastav, ugradljivost i zahtevana čvrstoća valjanog betona.

*Cena vezivnih materijala* je na drugom mestu po uticaju na cenu RCC-a, jer čini oko 30 % od ukupne cene. Jedinična cena masnijih mešavina (pri istim ostalim uslovima) može biti duplo veća od cene mešavina sa malom količinom vezivnih materijala, ili znatno većom količinom pucolana u odnosu na količinu cementa.

Preostalih 30 % od cene valjanog betona zavisi od proizvodnje, transporta, ugrađivanja, obrade horizontalnih spojnica, transverzalnih razdelnica itd.

Za svaki konkretan pregradni profil bitno je napraviti celovitu analizu mogućnosti iskorišćenja svih postojećih pozajmišta agregata i uz punu objektivnost sagledati sve moguće vrste valjanog betona sa njihovim pretpostavljenim jediničnim cenama. Treba početi od minimalne zapremine brane i upotrebe relativno skupog RCC-a i završiti sa branom veće zapremine, ali od jeftinijeg valjanog betona. Pri tome, u obzir treba uzeti sve činioce koji utiču na cenu i očekivani kvalitet konstrukcije.

#### 3.1. Uštede usled brzine građenja

Primenom odgovarajućih konstruktivnih mera, kod brana srednjih visina i prosečnog odnosa dužine i visine, moguće je dostići brzinu građenja (u visinu) od čak 5 m za nedelju dana. Na taj način obično se uštedi jedna građevinska sezona u poređenju sa rešenjima

zasnovanim na primeni klasičnog hidrotehničkog betona. Uštede se odnose na sledeće:

- niža cena proizvodnje i ugrađivanja valjanog betona koju omogućavaju veliki dnevni učinci (izuzev u zoni temeljne spojnice i krune brane) i pravilno iskorišćenje prednosti mehanizacije;
- smanjenje učešća mehanizacije i opreme u ceni betona zbog kraćeg vremena angažovanja;
- vremenska ušteda jedne građevinske sezone uz povećane troškove izgradnje u zimskim uslovima;
- uštede usled smanjenja dimenzija konstrukcija za evakuaciju vode u toku građenja koje proističu iz kraćeg vremena građenja, a bez uticaja na sigurnost gradilišta.

Da bi se ostvarile sve nabrojane uštede, a naročito da bi se postigla planirana brzina građenja, neophodno je ispuniti sledeće kriterijume:

- u telu brane izbegavati konstrukcije koje ometaju tehnologiju ugrađivanja valjanog betona;
- koristiti jedinstvenu vrstu valjanog betona za čitavo telo brane;
- vodonepropustljivost rešiti na uzvodnom licu, tako da se u telu brane obrada horizontalnih spojnica svede na minimum;
- optimizovati debljinu sloja tako da se dobije najbolje moguće iskorišćenje kapaciteta fabrike betona i ograniči broj spojnica.

Pored toga, značajni finansijski efekti ostvaruju se zbog ranijeg početka eksploatacije brane i akumulacije, čime se skraćuje period obrta kapitala.

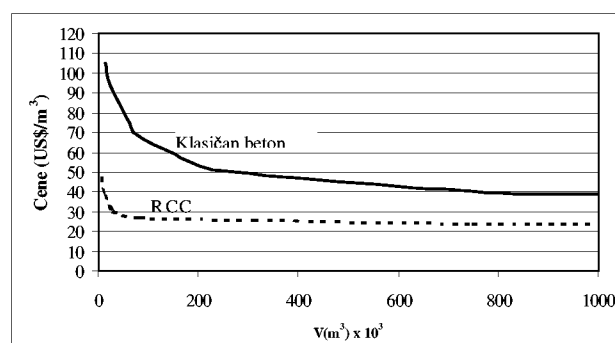
### 3.2. Uštede usled upotrebe valjanog betona

U uvodnom delu naglašen je značaj zavisnosti cene od vrste primenjenog RCC-a. Glavni činioci koji utiču na cenu valjanog betona su:

- poreklo agregata (prirodni ili veštački);
- položaj pozajmišta agregata u odnosu na profil brane;
- tretman agregata (samo prosejavanje ili pranje, drobljenje, separisanje, i dr.);
- manji sadržaj finih čestica agregata;
- količina i vrsta vezivnih materijala (običan portland cement, specijalni vezivni materijali ili aktivne fine čestice);
- skladištenje materijala pre upotrebe (često odlučujući činioc brzine građenja);
- kapacitet fabrike betona i tempo napredovanja radova;

- pristupni putevi i sredstva za transport (trake, kranovi, kamioni, ...)
- postupci obrade horizontalnih spojnica, transverzalnih razdelnica i kontrola kvaliteta;
- ograničenja u zoni temelja, krune brane, kontura, galerija, i sl.

Da bi se sagledala ušteda usled upotrebe valjanog betona u odnosu na brane od klasičnog betona, može poslužiti slika 16. Uočava se da se jedinična cena kod klasičnih betonskih brana kreće od cca 120  $\$/m^3$  (za brane zapremine manje od 50.000  $m^3$ ) do 50  $\$/m^3$  (za brane zapremine veće od 1.000.000  $m^3$ ). Kod brana od valjanog betona jedinična cena je oko 40  $\$/m^3$  (brane zapremine manje od 50.000  $m^3$ ), odnosno ispod 30  $\$/m^3$  (kod brana zapremine veće od cca 400.000  $m^3$ ).



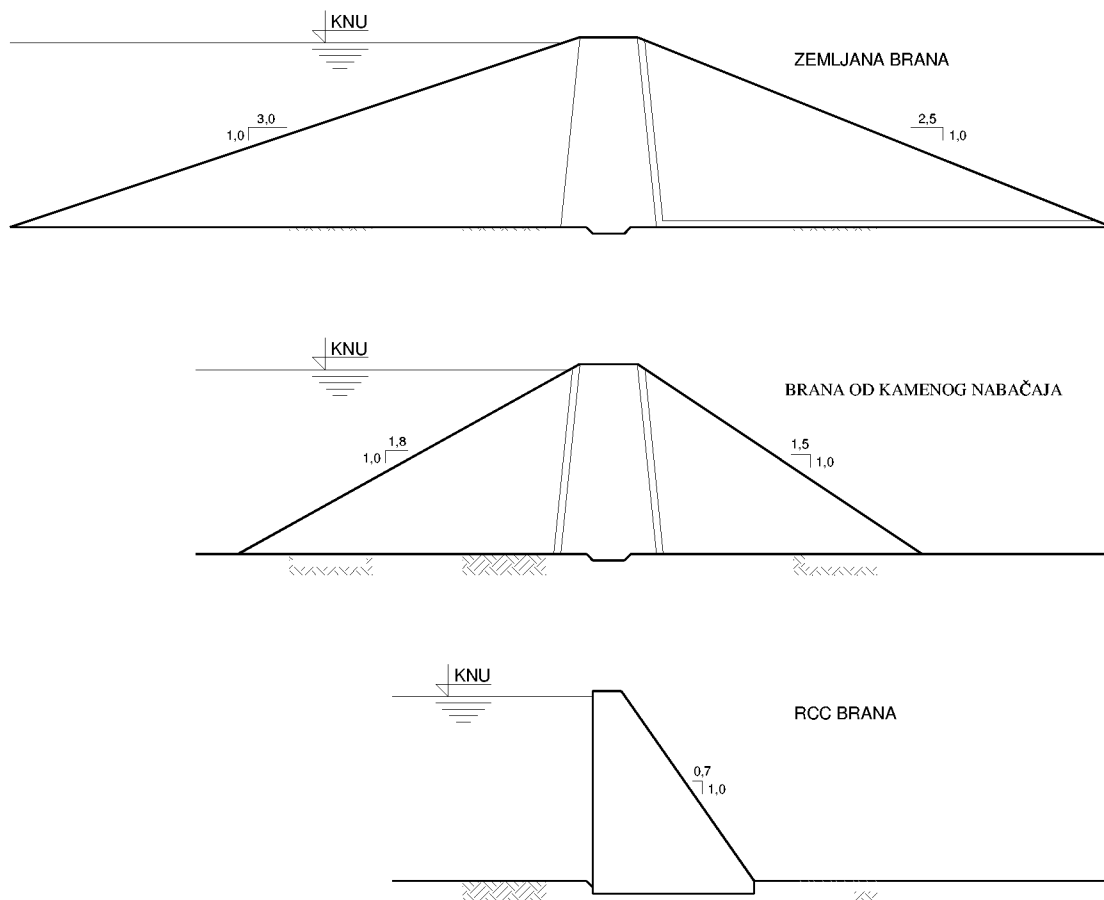
Slika 16. Poređenje jediničnih cena klasičnih i gravitacionih brana od valjanog betona

Kada je u pitanju odnos cena RCC brana i nasutih brana (zemljanih ili od kamenog nabačaja) potrebno je imati u vidu i razlike u zapreminama brana iste visine koje proističu iz različitog oblika poprečnog preseka, slika 17.

Ako se za prikazane karakteristične poprečne preseke nacрта zavisnost zapremine (po jedinici dužine brane) od visine brane, slika 18., uočava se da je zapremina brane (visine od 30 do 120 m) od kamenog nabačaja veća približno 4 do 4,5 puta nego zapremina brane od valjanog betona. Kod nasutih zemljanih brana ovaj odnos iznosi od 6 do 7,5.

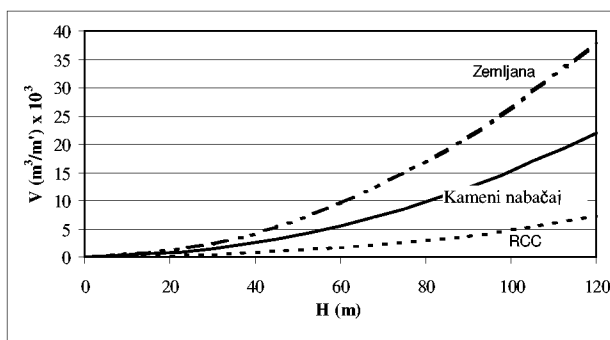
Istraživanja sprovedena u SAD, [1], pokazuju da prosečne jedinične cene materijala iznose:

- za zemljanu branu 5,0 US\$/ $m^3$ ;
- za branu od kamenog nabačaja 10,0 US\$/ $m^3$ ;
- za RCC branu 31,0 US\$/ $m^3$ .



Slika 17. Karakteristični oblici poprečnog preseka zemljane brane, brane od kamenog nabačaja i brane od valjanog betona

Imajući u vidu odnose zapremina, i jedinične cene dobijeno je, [1], da su brane od valjanog betona po ceni konkurentne zemljanim branama višim od 9 m, odnosno za brane od kamenog nabačaja koje su više od 31 m.



Slika 18. Zavisnost zapremine (po jedinici dužine brane) od visine brane

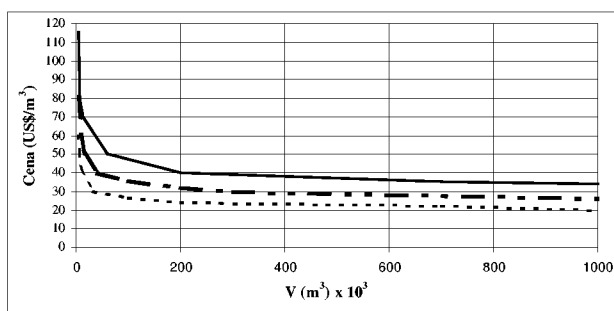
### 3.3. Određivanje jedinične cene RCC-a

Istraživanja sprovedena u Francuskoj, [5], pokazuju da je orijentaciona struktura jedinične cene valjanog betona sledeća:

1) cena agregata	42 %
2) cena vezivnih materijala	26 %
3) proizvodnja i transport	11 %
4) ugrađivanje	6 %
5) obrada spojnica	9 %
6) oplata	3 %
7) ispitivanja	3 %

Ukupna jedinična cena može varirati u odnosu od 1 do 2 što prvenstveno zavisi od dostupnosti pozajmišta agregata, predviđenog tretmana i specifičnosti projekta RCC-a.

Prosečne jedinične cene, u zavisnosti od količine ugrađenog valjanog betona prikazane su na slici 19. Gornja i donja linija predstavljaju anvelope maksimalnih, odnosno minimalnih vrednosti, a srednja linija prosečne jedinične cene.



Slika 19. Prosečne cene u zavisnosti od količine valjanog betona

Pri proračunu jedinične cene potrebno je imati u vidu sve što je napred rečeno, sastav valjanog betona i projektovanu tehnologiju ugrađivanja. Analiza jedinične cene vrši se prema modelu u tabeli 2.

Da bi se dobile što realnije vrednosti, po pravilu treba konsultovati potencijalne izvođače i od njih tražiti jedinične cene pojedinih pozicija radova. Pri tome treba imati u vidu tehnološki projekat, odnosno dinamički plana izvođenja radova.

Analiza ekonomskih aspekata predstavlja jedno od najvažnijih pitanja pri izboru tipa brane. Sva dosadašnja iskustva pokazuju nesumnjive ekonomske prednosti RCC brana u odnosu na klasične gravitacione betonske brane, koje proističu iz niže jedinične cene valjanog u odnosu na klasičan beton i kraćeg vremena građenja. Takođe, ako je veća visina, brane od valjanog betona po jediničnoj ceni materijala postaju konkurentne i nasutim zemljanim, kao i branama od kamenog nabačaja. Dodatne ekonomske prednosti RCC brana u odnosu na nasute brane proističu iz razlike u ceni izgradnje objekata za evakuaciju velikih voda i zahvatanje vode, koje kod nasutih brana predstavljaju značajan deo cene čitavog objekta. Na osnovu svega navedenog, ukoliko je pozajmište agregata relativno blizu, sledi da su gravitacione brane od valjanog betona po pravilu konkurentne svim tipovima brana.

Tabela 2. Analiza jedinične cene RCC-a

R. br.	Opis pozicije radova	jedinica mere	jedinična cena
<b>I Mehanizacija i oprema</b>			
I.1.	Droбилana i separacija	US\$/m <sup>3</sup>	
I.2.	Fabrika betona	US\$/m <sup>3</sup>	
I.3.	Sistem hlađenja agregata	US\$/m <sup>3</sup>	
I.4.	Kamioni i damperi	US\$/m <sup>3</sup>	
I.5.	Auto-mešalice	US\$/m <sup>3</sup>	
I.6.	Kamioni silosi za cement i EFP	US\$/t km	
I.7.	Transportni sistem	US\$/m <sup>3</sup>	
I.8.	Buldozeri	US\$/m <sup>3</sup>	
I.9.	Vibrovaljci 10 t	US\$/m <sup>3</sup>	
I.10.	Mali vibrovaljci do 2 t	US\$/m <sup>3</sup>	
I.11.	Ručna sredstva za zbijanje	US\$/m <sup>3</sup>	
I.12.	Kopresori za vazduh	US\$/m <sup>3</sup>	
I.13.	Mobilne dizalice	US\$/m <sup>3</sup>	
I.14.	Garniture za bušenje	US\$/m <sup>1</sup>	
<b>II Materijali</b>			
II.1.	Agregat	US\$/m <sup>3</sup>	
II.2.	Cement	US\$/t	
II.3.	Elektrofilterski pepeo (EFP)	US\$/t	
II.4.	Aditivi	US\$/kg	
II.5.	Voda	US\$/m <sup>3</sup>	

II.6.	Zaptivne trake	US\$/m <sup>1</sup>	
II.7.	Armatura	US\$/t	
II.8.	Oplata	US\$/m <sup>2</sup>	
<b>III Radna snaga</b>			
III.1.	Betonski radovi	US\$/m <sup>3</sup>	
III.2.	Armirački radovi	US\$/t	
III.3.	Oplata uzvodne konture	US\$/m <sup>2</sup>	
III.4.	Klizna oplata	US\$/m <sup>2</sup>	
III.5.	Oplata nizvodne konture	US\$/m <sup>2</sup>	
III.6.	Oplata galerije	US\$/m <sup>2</sup>	
III.7.	Kontrola kvaliteta	US\$/m <sup>3</sup>	
III.8.	Zaštita	US\$/m <sup>3</sup>	
III.9.	Obrada horizontalnih spojnica	US\$/m <sup>2</sup>	
III.10.	Nega betona	US\$/m <sup>2</sup>	
<b>IV Dodatni radovi</b>			
IV.1.	Obrada hladnih spojnica	US\$/m <sup>2</sup>	
IV.2.	Nepredviđeni radovi	US\$/m <sup>3</sup>	

#### 4. ZAKLJUČAK

Jedna od osnovnih razlika između RCC i brana od klasičnog hidrotehničkog betona jeste tehnološki proces građenja mehanizacijom za nasute brane. Zbog toga je veoma važno dobro proučiti postupak spravljanja, transporta, razastiranja i zbijanja mešavine valjanog betona. Pri tome treba imati u vidu i sve specifičnosti vezane za horizontalne spojnice, obradu kosina i izgradnju galerija i drenaža.

Da bi brana imala projektovanu upotrebljivost i trajnost, ugrađeni beton mora zadovoljiti projektne kriterijume. Zbog toga je neophodna redovna i sistematska kontrola kvaliteta svih bitnih osobina materijala, mešavine i očvrslag valjanog betona.

Pravilnim izborom sastava mešavine, oblika poprečnog preseka i tehnologije ugrađivanja, vrlo često se može postići da brane od valjanog betona po ceni i brzini građenja budu povoljnije od svih ostalih tipova brana.

#### LITERATURA

- [1] Charles V. Logie: "Economic Consideration In Selection of a Roller Compacted Concrete Dam", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 111-122.
- [2] Howard L. Boggs and Alan T. Richardson: "USBR Design Considerations for Roller Compacted Concrete Dams", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 123-139.
- [3] Kenneth D. Hansen, William G. Reinhardt: "Roller Compacted Concrete Dams", McGraw-Hill, , 1986.
- [4] G. S. Sarkaria, F. R. Andriolo: "Special factors in design of high RCC gravity dams", International Water Power & Dam Construction, 1996.
- [5] French National Research Project BaCaRa: "Roller Compacted Concrete, RCC for dams", Paris, 1997.
- [6] Ksenija Neimarević: "Nove metode građenja betonskih i nasutih brana", Saopštenja sa I Kongresa Jugoslovenskog društva za visoke brane, Budva, 1997.
- [7] American Concrete Institute: "Roller Compacted Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete, 1997.
- [8] Francisco R. Andriolo: "The Use of Roller Compacted Concrete", São Paulo-Brazil, 1998.
- [9] Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, Volume I, Chengdu, China, 1999.
- [10] Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, Volume II, Chengdu, China, 1999.
- [11] ICOLD Bulletin: "State-of-the-art of Roller Compacted Concrete Dams", Paris, 2000.



[12] USACE: "Engineering and Design. Roller-Compacted Concrete", Manual No 1110-2-2006, Washington, 2000.

[13] M. Muravljev, V. Kuzmanović: Glavni projekat brane Bogovina, Knjiga "Tehnološki proces izgradnje brane 'Bogovina' od RCC-a", Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 2003.

## ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) IN DAM CONSTRUCTION PART FOUR - CONSTRUCTION, QUALITY CONTROL AND ECONOMIC ISSUES

by

Vladan KUZMANOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

### Summary

The last of the four-paper serial on RCC dams refers to construction, quality-control and economic issues. The first part deals with the most important construction features, such as: concrete preparation, transportation, spreading, compaction, joints, galleries, drainage and concrete care and protection. Follows a section on laboratory and in-situ tests for the RCC concrete

quality-control, based on the ACI and USACE recommendations. The last part addresses economic issues, possible savings, and the RCC cost structure.

Key words: RCC, dams, transportation, construction, spreading and compaction, horizontal joints, quality-control, cost.

Redigovano 20.04.2005.