



## ČETIRI DESETLJEĆA GRAĐENJA BRANA OD UVALJANOG BETONA

mr. sc. **Krešimir Šaravanja**, dipl. ing. građ.  
Građevinski fakultet Sveučilište u Mostaru  
Van. prof. dr. sc. **Azra Kurtović**, dipl. ing. građ.  
Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu

**Sažetak:** Koncept uvaljanog betona (UB) je nastao kombiniranjem ekonomičnosti i brzine (opreme) građenja nasutih brana sa sigurnošću betonskih brana. Tehnologija UB je našla veliku primjenu širom svijeta, prvenstveno za građenje i sanaciju betonskih brana, ali i za građenje industrijskih kolnika, parking prostora, cesta, auto-cesta, aerodromskih pista, te za brojne druge primjene. U proteklih pola stoljeća, od nastanka ideje o građenju UB brana i probnih građevina, preko prvih UB brana početkom 1980-tih godina, do danas uspješno završenih UB brana visine preko 200 m, UB je prešao dug i zahtjevan put od ideje do opće prihvaćenog metoda građenja. U prvom dijelu rada dat je uvod o UB, kratka povijest građenja UB brana i njihove projektne filozofije. U središnjem dijelu rada prikazano je 10 posebno izdvojenih projekata UB brana I osvrt na projektirane i izgrađene UB brane u BiH i regiji. U zaključcima su istaknuta očekivanja primjene UB kod građenja UB brana, imajući u vidu održivi razvoj.

**Ključne riječi:** (u)valjani beton, UB, brana, tehnologija, građenje

## FOUR DECADES OF THE RCC DAMS BUILDING

**Abstract:** The concept of Roller Compacted Concrete (RCC) was created by combining the efficiency and speed construction of earth dams with safety of concrete dams. Technology of the RCC has found extensive application worldwide, primarily for the construction and repair of concrete dams, but also for the construction of industrial pavements, parking space, roads, highways, airport runways, and for numerous other applications. Over the past half-century, since the creation of the idea of building RCC dams and trial structures, over the first RCC dams in the early 1980s, to date, successfully completed RCC dams over 200 m, RCC has gone a long and demanding journey from the idea to the generally accepted method of construction. The first part of this paper presents the introduction about RCC, a short history of RCC dam construction and their project philosophy. In the central part of this paper 10 specially separated RCC dams projects are presented, as well as reviews of the planned and built RCC dams in B&H and the region. In the final part of this paper, the expectations of the RCC's application in the construction of concrete dams, taking into account sustainable development, are highlighted.

**Key words:** Roller Compacted Concrete, RCC, dam, technology, construction



## 1. UVOD O UVALJANOM BETONU (UB)

Uvaljani beton - UB (engleski: Roller-Compacted Concrete - RCC) „predstavlja novi koncept transporta, ugradbe i zbijanja betona sa slijeganjem nula u svježem stanju korištenjem opreme za zemljane i kamene nasipe". Riječ je o suhom betonskom materijalu, krute konzistencije, koji se zbija vanjskim vibriranjem, korištenjem vibro-valjaka. Od klasičnog betona (KB) se razlikuje po konzistenciji i načinu ugradbe. Za učinkovito zbijanje, UB u svježem stanju treba biti dovoljno krut, odnosno suh da nosi težinu vibro-opreme, bez tonjenja, ali i dovoljno vlažan (mješavina mora sadržavati i dovoljnu količinu vode) da bi se omogućila homogena raspodjela veziva (vezivne paste) kroz masu tijekom procesa miješanja i zbijanja betona, te hidratacija cementa.

U isto vrijeme moramo biti upoznati s određenim specifičnostima i ograničenjima u primjeni UB. Zbog vrlo suhe mješavine potrebno je proces miješanja provoditi s većom pažnjom da se dobije homogena mješavina, te zbog povećanog otpora miješanju količina materijala tijekom miješanja treba biti manja od uobičajene. Potrebno je obratiti dodatnu pozornost i osigurati mjere da se tijekom transporta ne dogodi gubitak vlage proizvedene mješavine, a zbog vrlo suhe mješavine moguća je potreba za većim doziranjem dodataka betonu u odnosu na uobičajene količine doziranja.

Prema ACI (Američki institut za beton) Komitetu 207 (Komitet za masivni beton), UB (eng. UB je nastao kao odgovor na "neprimjerenu" i vrlo skupu uporabu KB kod gravitacijskih brana. Ako je potreban beton visoke kvalitete, UB ga može dostići. Međutim, što je posebno važno, ukoliko nije potrebna velika čvrstoća moguće je napraviti ugrađiv UB sa malom količinom vezivnih materijala.<sup>11</sup>

Da bi se dobila brana koja na najbolji način koristi sve prednosti tehnologije UB, neophodno je imati u vidu principe projektiranja i dimenzioniranja, utjecaje seizmike i termičku analizu, pitanje razdjelnica, brtvi i galerija, specifičnosti temeljenja, prelijevanja i promatranja. Na taj način negativni stavovi na račun brana od UB bit će najbolje demantirani, dobit će se relativno jeftina konstrukcija i bit će maksimalno ispunjeni svi zahtjevi kvalitete, uporabljivosti, stabilnosti i trajnosti.<sup>11</sup>

Zbog velike brzine ugradbe UB (čak do 18.500 m<sup>3</sup>/dan), tisuće kubičnih metara lošeg UB može brzo biti ugrađeno u objekt, odnosno zbijene etaže neodgovarajuće kvalitete mogu biti prekrivene novim etažama UB. Zbog toga kontrola kvalitete kod građenja brana od UB ima svoje specifičnosti:

- organizacija ljudi, materijala i strojeva mora biti na pravom mjestu u pravo vrijeme!
- radi pravodobnog identificiranja UB neprihvatljive kvalitete zahtjeva se kombinacija programa ispitivanja s vizualnim nadzorom komponenti, postrojenja za agregat i beton, konzistencije i prostorne mase UB poslije miješanja i u tijeku ugradbe! Samo tako mogu se poduzeti odgovarajuće aktivnosti korigiranja mješavine ili postupka građenja!
- potrebna je primjena specijalne ispitne opreme!

Iako su gravitacijske brane od UB po svojim karakteristikama slične branama od hidrotehničkog KB, zbog brojnih specifičnosti, neophodno je biti vrlo pažljiv u postupku projektiranja. Mogućnosti promjene oblika poprečnog presjeka, uporaba mješavina bitno različitih svojstava, a naročito tehnologija ugrađivanja u slojevima, pružaju projektantima priliku konstrukciju maksimalno prilagoditi uvjetima sredine u kojoj se brana gradi.<sup>11</sup>



## 2. POVIJEST GRAĐENJA UB BRANA

U proteklih pola stoljeća, od nastanka ideje o građenju brana od (u)valjanog betona (UB) i probnih građevina 1970-tih godina, preko prvih brana početkom 1980-tih i uspješno završenih velikih brana visine preko 200 m, UB je prešao put od ideje do opće prihvaćenog metoda građenja. 1960. godine John Lowe III je prvi put primijenio termin „Rollcrete“ za materijal koji je korišten za izradu jezgre brane Shihmen (Taiwan). Graditelji su ovlaženom pješčaru dodavali cement i lebdeći pepeo, razastirali ga u slojevima po 30 cm i zbijali kretanjem transportnih sredstava i teških dozera, koji su ujedno vršili razastiranje. 1965. godine na maloj brani Quebec-a (Kanada) mršavu betonsku mješavinu razastirali su dozeri, a uzvodno i nizvodno lice su ojačavani protiv djelovanja vode i atmosferilija primjenom oplata i prefabriciranih blokova. Ušteda u usporedbi sa varijantom iste brane koja bi bila izgrađena od KB, je bila za to vreme neočekivana: 20% u novcu i preko 60% u vremenu. Godine 1968. UB je primijenjen za građenje masivnih temelja kanala za evakuaciju vode na brani Cochiti (New Mexico, SAD). Godine 1970. TVA - Tennessee Valley Authority je radio probno polje od UB na brani Tims Ford (Tennessee, SAD), a tijekom 1972. i 1973. godine USCE (U.S. Army Corps of Engineers) je sproveo obimna istraživanja na probnim poljima brana Jackson (Mississippi) i Lost Creek (Oregon), obje u SAD. Prvi značajniji projekt uporabe UB bio je 1974. godine pri sanaciji jednog od tunela temeljnog ispusta brane Tarbela u Pakistanu, gdje je za 44 dana ugrađeno čak 350.000 m<sup>3</sup> UB. Poslije prve sezone rada došlo je do erozije bokova i dna slapišta, pa je za 5 mjeseci ugrađeno dodatnih 500.000 m<sup>3</sup> UB. Od 1974. do 1982. godine ukupno je ugrađeno čak 2,7 milijuna m<sup>3</sup> UB, sa 87 kg/m<sup>3</sup> cementa i prosječnom tlačnom čvrstoćom od 12,6 MPa, a UB je zbijan u slojevima debljine 33 cm, sa 4 prijelaza vibro-valjkom težine 9 t. I nadalje se UB u građenju brana koristio najviše u SAD-u, a od 1974. godine u Japanu je razvijana posebna vrsta UB, primijenjena na brani Shimajigawa, prvoj izgrađenoj brani od UB u svijetu (1980), visine 89 volumena 317.000 m<sup>3</sup> betona, od čega 165.000 m<sup>3</sup> UB (1980). Prva brana izgrađena u potpunosti od UB, a druga izgrađena brana u svijetu od UB, je brana Willow Creek (SAD), visine 52 m, volumena 331.000 m<sup>3</sup>, izgrađena od 1981.-1983. godine.<sup>9</sup>

Na temelju istraživanja Dunstan-a, do kraja 2002. godine u svijetu je izgrađeno 238 brana od UB visine preko 15 m, od čega 25 brana visine preko 100 m.<sup>(8),8</sup> Do 1987. godine urađen je mali broj brana, po 2-3 godišnje, nakon čega je proces višestruko ubrzan. U početku su visine brana bile 40-50 m, uz volumen UB između 100.000 i 200.000 m<sup>3</sup>. Do kraja 2002. godine prosječna visina je dostigla 70 m, uz preko 400.000 m<sup>3</sup> ugrađenog UB. Od 25 brana visine preko 100 m, najviše su bile: Miel I u Kolumbiji (188 m), Urayama u Rusiji (156 m) i Miyagase u Japanu (155 m). Prema volumenu ugrađenog UB najveće su bile: Beni Haroun u Alžiru (1,690.000 m<sup>3</sup>), Miel I (1,669.000 m<sup>3</sup>) i Miyagase (1,537.000 m<sup>3</sup>). Najduže krune su imale brane: Las Blancas u Meksiku (2.795 m), Umari u Brazilu (2.308 m) i Lajeado u Brazilu (2.100 m).<sup>8</sup>

Od 238 izgrađenih brana do kraja 2002. godine, Japan je imao 39 brana, od čega 11 brana visine preko 100 m). Japanske UB brane su konkurentne čak i zemljanim branama i branama od kamenog nabačaja. Japan ima prvu branu izgrađenog od UB u svijetu (Shimajigawa), drugu i treću UB branu po visini, ali i treću i petu UB branu po volumenu. Prosječna visina im je bila 87 m, uz prosječnu količinu UB od 361.000 m<sup>3</sup> (od 577.000 m<sup>3</sup> ukupnog betona).<sup>8</sup>

Do kraja 2002. godine Kina je izgradila 7 brana visine preko 100 m. Prva brana, Kengkou, visine 57 m, volumena 43.000 m<sup>3</sup> UB, duljine u kruni 123 m, izgrađena je 1986. godine, a do 1989. godine izgrađeno je već 5 brana. Prosječna visina im je 68 m, a prosječna količina UB je 272.000 m<sup>3</sup>, ili oko dvije trećine ukupno ugrađenog betona (410.000 m<sup>3</sup>). Najviša je brana



Jiangyia, visine 131 m, a najveći volumen je imala brana Guanyinge sa 1,240.000 m<sup>3</sup>, od ukupno 1,970.000 m<sup>3</sup> betona.<sup>8</sup>

U SAD je izgrađena prva brana u potpunosti od UB, brana Willow Creek, koja je ujedno druga izgrađena brana od UB u svijetu. Američke UB brane nisu tako visoke kao japanske i kineske - samo 35 m sa 114.000 m<sup>3</sup> UB, ili čak oko 90% ukupno ugrađenog betona (126.000 m<sup>3</sup>). Već je prikazana najviša UB brana u SAD - Upper Stillwater, vidine 91 m, sa 1,125.000 m<sup>3</sup> UB, od 1,281.000 m<sup>3</sup> ukupnog betona, u to vrijeme druga UB brana po visini na svijetu. Volumen UB ove brane daleko prelazi prosjek u SAD.<sup>8</sup>

U razdoblju 1986. do kraja 2002. godine Brazil je izgradio 27 UB brana, prosječne visine 46 m, što je niže od prosječnih japanskih UB brana (87 m) i kineskih UB brana (68 m), ali više od prosječnih SAD UB brana (35 m). Prosječna količina ugrađenog UB je bila 273.000 m<sup>3</sup> UB, ili samo 40% ukupnog betona (prosječno 688.000 m<sup>3</sup>). Najveća količina je ugrađena u UB branu Santa Cruz de Apodi (1,023.000 m<sup>3</sup> UB), a ukupno najveća količina betona je ugrađena u branu Tucurui II (8,800.000 m<sup>3</sup> betona). Neke od njih imaju vrlo veliku duljinu u kruni brane - od prvih pet u svijetu, četiri su u Brazilu. Najviša brazilska brana je Jordao (1996), visine 95 m, sa 570.000 m<sup>3</sup> UB, od ukupno 647.000 m<sup>3</sup> betona.<sup>8</sup>

U razdoblju 1985. do kraja 2002. godine Španjolska je izgradila 22 UB brana, prosječne visine 47 m, slične visine kao brazilske (47 m), niže od prosječnih japanskih UB brana (87 m) i kineskih UB brana (68 m), ali više od prosječnih SAD UB brana (35 m). Prosječna količina ugrađenog UB je bila 142.000 m<sup>3</sup> UB, ili čak 86% ukupnog betona (prosječno 166.000 m<sup>3</sup>), skoro kao kod UB brana u SAD (90%).<sup>8</sup>

Krajem 2008. godine oko 350 visokih brana (preko 15 m) je bilo izgrađeno širom svijeta.<sup>28</sup>

Prva UB brana visine preko 200 m je bila UB brana Longtan na rijeci Hongshui u Kini (217 m), gdje je ugradnja UB završena u proljeće 2008. godine, a cijeli projekt krajem 2009. godine. Najveća do sada izgrađena UB brana je Gibe III u Etiopiji, visine 246 m, gdje je prije godinu i pol završena ugradnja UB, a kompletan projekt će biti okončan 2018. godine. Stečeno je dovoljno povjerenja u dobro oblikovane UB brane tih visina, što je pomoglo u postizanju odgovarajuće ravnoteže između sigurnosti, gospodarstva i zaštite okoliša.

Prema podacima iz travnja 2014. godine, u svijetu je bilo 550 UB brana visine preko 15 m, a većina (oko 45%) se nalazila u Aziji.<sup>29</sup>

### 3. PROJEKTNE FILOZOFIJE UB I PROSJEČNI OMJERI MJEŠAVINA ZA SVAKU OD NJIH

UB ima vrlo slična fizikalno-mehanička svojstva kao i KB, te sadrži iste sastavne sastojke, ali u nešto drukčijem odnosu. U pojedinim slučajevima primjene za poboljšanje svojstava betona dodaju se kemijski i mineralni dodaci. Za izradu UB preporučuje se cement CEM I i CEM II. Podobnost vode za izradu UB i obnovljene vode iz proizvodnje betona utvrđena je zadovoljenjem uvjeta norme EN 1008. Najznačajnija razlika agregata za UB od agregata za KB je u granulometrijskom sastavu krupnog i sitnog agregata. Mješavine UB su manje kohezivne od mješavina KB zbog manjeg sadržaja vode i zbog toga treba obratiti pažnju na segregaciju agregata. Maksimalno zrno agregata najčešće iznosi 19 mm (iznimno do 25 mm). Mješavine UB s agregatom dvostruko većeg zrna su grube i neobradive, te sklone segregaciji pri rukovanju.<sup>5</sup> Najveća razlika u sastavu UB i KB je u većem udjelu finijih čestica agregata i u manjoj količini cementa u UB. U novije vrijeme koriste se i dodaci betonu



(aeranti za veću otpornost betona na smrzavanje i soli, dodaci za usporenje vezanja, te određena kemijska sredstva za posebnu završnu obradu površine betona). Sve više se koriste i mineralni dodaci: lebdeći pepeo (LP), čiji dodatak znatno utječe na kasnije čvrstoće betona, na poboljšavanje obradivosti betona, smanjenje propusnosti betona, uštede u proizvodnji, pogodnost za gradnju masivnih betonskih konstrukcija, povećanje čvrstoće i trajnost betona, i silicijska prašina (SP), čijim se dodatkom SP popunjava struktura betona, povećava (tlačna i vlačna) čvrstoća UB i otpornost na smrzavanje. Superplastifikatori se mogu dodati, ali obzirom na malu količinu vode nema opravdanog razloga za njihovu uporabu. Prednost je UB to što kemijski dodaci nisu presudni u izvođenju kvalitetnog UB.

Na 16. ICOLD-ovom kongresu (1988) Dunstan je predložio 3 različita koncepta brana od UB:<sup>18</sup>

- *Brane od mršavog UB („Lean RCC“)*, sa sadržajem veziva od 60 do 120 kg/m<sup>3</sup> (PC i pucolan), od čega može biti pucolana do 40%. Beton se ugrađuje u slojevima debljine 25 do 40 cm. Neke od ovih brana su sadržavale agregate s visokim udjelom sitnih čestica. Primjeri su brane *Willow Creek* i *Grindstone Canyon* (SAD). Ove brane koriste uzvodnu vodonepropusnu membranu za zaštitu mršavog UB u unutrašnjosti. Membrana može biti pervibrirana betonska obloga (do 50 cm debela), ugrađena istovremeno kada i unutarnji beton i oblikovana klasičnom oplatom, ili prefabricirani betonski paneli, s ili bez PVC-membrane. Međuslojevi od betona s većim sadržajem veziva se ugrađuju između etaža, iza uzvodne membrane, radi poboljšanja njihove veze i smanjenja procjeđivanja između slojeva UB, jer nije problematična vodopropusnost samog UB, već njegovih spojnica;
- *Rolled Concrete Dam (RCD) metod*, razvijen u Japanu, se dosta razlikuje od ostalih. To je relativno skupa tehnologija, sa vrlo kvalitetnim konstrukcijama koje sadrže malu količinu UB u odnosu na ukupnu količinu betona. Beton se ugrađuje u 3-4 sloja i zbija u debelim etažama (70-100 cm). Zbog velike debljine etaža za zbijanje, postoji obično vremenski interval od najmanje 3 dana do ugradbe nove horizontalne etaže. Zbog toga se bez obrade površina etaža ne može ostvariti njihova dobra veza, pa se prije ugradbe naredne etaže na horizontalnoj spojnici razastire sloj morta. Spojnice se režu od uzvodne ka nizvodnoj strani brane. Unutarnji UB je zaštićen slojem KB, debljine 2-3 m, uz opsežan sustav brtvi i drenaža na svakoj spojnici. Sadržaj vezivnih materijala u japanskim UB branama je bio od 120 kg/m<sup>3</sup> (brane visine do 100 m) do 130 kg/m<sup>3</sup> (brane više od 100 m), uz udio pucolana od 20-35% (za UB brane izgrađene do kraja 2002. godine prosječno 29%). Tipični primjeri su brane *Shimajigawa* i *Tamagawa*. To je modifikacija metoda građenja brane *Alpe Gera* (Italija), izgrađene početkom 1960-ih godina. Završena brana je vrlo slična gravitacijskoj brani od KB s odvojenim blokovima, iako su ovi naknadno formirani rezanjem spojnica. Metod je nešto brži nego kod brane od KB (cca. 10-15%), uz veći udio radne snage;<sup>8</sup>
- *Brane od UB s visokim sadržajem paste* (preko 20% volumena UB), odnosno s visokim sadržajem veziva (preko 150 kg/m<sup>3</sup>, od čega je udio pucolana 70-80%). Karakterističan je vrlo nizak sadržaj zračnih šupljina i dobra veza između slojeva, bez obrade površine etaža. Središnji dio UB brane se smatra vodonepropusnom barijerom, a vanjska obloga je otporan omotač koji zaštićuje i izolira unutarnji beton. Stoga UB mora biti projektiran da veže sloj sa slojem i da ima *in situ* vodonepropusnost ekvivalentnu onoj kod gravitacijske brane od KB. Beton se ugrađuje u tankim slojevima (obično 30 cm). Tipičan primjer je brana *Upper Stillwater* (SAD).

Analizirajući UB brane izgrađene do kraja 2002. godine, dobiveni su raznoliki podaci o količini korištenog veziva i udjelu pucolana u istom. Kineske brane sadržale su u prosjeku 176 kg/m<sup>3</sup> veziva, od čega 83 kg/m<sup>3</sup> cementa i 93 kg/m<sup>3</sup> pucolana. UB brane u SAD su sadržale u prosjeku 90 kg/m<sup>3</sup> cementa i 48 kg/m<sup>3</sup> pucolana (35%), ukupno 138 kg/m<sup>3</sup>, što je manje nego kod kineskih UB brana, a nešto više nego kod japanskih UB brana. Maksimalna količina od 184 kg/m<sup>3</sup> cementa, bez pucolana, korištena je na UB brani Rocky Gulch, a najveća količina pucolana od 173 kg/m<sup>3</sup>, odnosno 68,7% ukupnog veziva (252 kg/m<sup>3</sup>) je



korištena na UB brani Upper Stillwater. Brazilske UB brane imaju posne mješavine sa samo 86 kg/m<sup>3</sup> veziva (68 kg/m<sup>3</sup> cementa i 18 kg/m<sup>3</sup> pucolana), dok španjolske UB brane imaju najbogatije mješavine sa ukupno 202 kg/m<sup>3</sup> veziva (73 kg/m<sup>3</sup> cementa i 129 kg/m<sup>3</sup> pucolana, ili 64% ukupnog veziva).<sup>8</sup>

Uobičajena količina cementa kod brana od KB od 150-200 kg/m<sup>3</sup> s kvalitetnim agregatom daje beton čvrstoće poslije 90 dana veće od 25 MPa, koje su nepotrebne ako se promatraju maksimalni tlačni naponi u tijelu brane jer je za branu visoku cca 100 m, maksimalni tlačni napon (na nizvodnoj konturi u zoni temeljne spojnice) oko 2,5 MPa, odnosno 10 puta manji od postignute čvrstoće (u slučaju brane visoke 50 m i preko 20 puta).<sup>2,11</sup>

Postoje razlozi za uporabu veće količine cementa radi postizanja visoke tlačne čvrstoće:

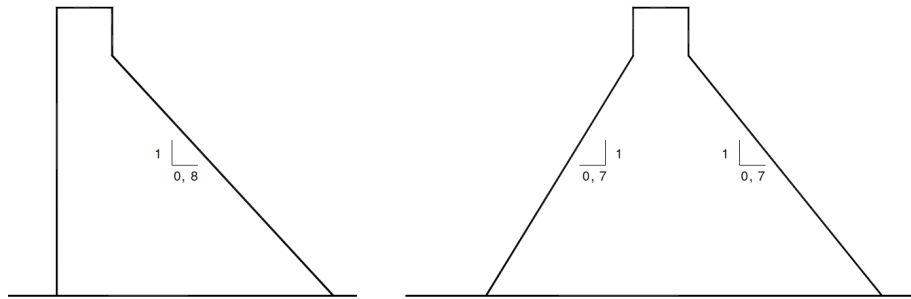
- 1) sa malom količinom cementa nije moguće postići homogen i lako ugradiv KB;
- 2) visoka tlačna čvrstoća garantira dovoljno visoku vlačnu i posmičnu čvrstoću, što je važno jer pojava vlačnih napona većih od dopuštene čvrstoće betona na uzvodnoj konturi nije dopuštena. To može izazvati pukotine u koje ulazi voda, povećavajući sile uzgona i dovodeći u pitanje stabilnost brane. Pošto visoka vlačna čvrstoća onemogućava nastanak pukotina, a vlačna čvrstoća je razmjerna tlačnoj, očigledno je da se kod klasičnih brana dobivaju znatno veće tlačne čvrstoće, odnosno koriste se više cementa od potrebnog;
- 3) uvjeti trajnosti i otpornosti na mraz mogu zahtijevati veće količine cementa, bar u zoni uzvodne i nizvodne konture.<sup>11</sup>

Ako je prethodno analizirana brana visine 100 m izgrađena od UB, s količinom cementa od 60 kg/m<sup>3</sup>, istraživanja su pokazala da se dobivaju tlačne čvrstoće oko 12 MPa, što je više nego dovoljno za maksimalnih 2,5 MPa. Odgovarajuća vlačna čvrstoća od oko 1,5 MPa onemogućava pojavu pukotina za statička opterećenja, pa čak i za potres čija je vodoravna komponenta 0,1 g, jer isti izaziva vlačne napone od 1,3 MPa.<sup>1,11</sup>

U prethodnoj analizi treba imati u vidu da je koeficijent sigurnosti za vlačnu čvrstoću jedva malo veći od 1,0. Pored toga, vlačna čvrstoća u horizontalnim spojnica za UB sa količinom cementa od 60 kg/m<sup>3</sup> je manja od vlačnih napona uslijed potresa. Rješenje je povećanje količine cementa na 120 kg/m<sup>3</sup> betona, ili zakositi uzvodnu konturu u nagibu 1:0,1. Oba ova rešenja dovode do povećanja koeficijenta sigurnosti na 2,0.<sup>11</sup>

Ovakva razmatranja dovela su do ideje da se uzvodna kontura još više zakosi, uz uporabu jeftinog lokalnog agregata i minimalne količine cementa u UB. Rezultati su bili više nego zanimljivi. Maksimalni vlačni naponi uslijed potresa bili su manji od vlačne čvrstoće betona, a tlačna čvrstoća od 6 MPa sasvim dovoljna. Pored toga, ispostavilo se da je ovakva brana jeftinija od UB brane klasičnog poprečnog presjeka sa kvalitetnijim UB.<sup>11</sup>

Daljnja istraživanja francuskih stručnjaka dovela su do *simetričnog tipa* brana od UB sa nagibima obiju kontura od 1:0,7. Ovakav oblik poprečnog presjeka potpuno je eliminirao pojavu vlačnih napona. Uporabom jeftinog agregata i male količine cementa, sa membranom na uzvodnom licu brane kojom se rješava problem vodopropusnosti, dobiven je tzv. "*hardfill*" tip UB brana. Proračun napona uslijed potresa, ili uslijed iznimnog opterećenja od vode, pokazao je značajne prednosti ovog tipa brane u odnosu na UB branu klasičnog poprečnog presjeka. Dodatna prednost je da se ovaj tip može koristiti i za temeljenje u stijinama vrlo slabih mehaničkih karakteristika.<sup>11</sup>



Slike 1.-2. Klasičan (lijevo) i „hardfill“ tip poprečnog presjeka UB brana (desno)<sup>11</sup>

Dakle, građenje UB brana viših od 100 m sredinom 1990-tih godina (Pangue, Porce II, Jiangya, Miel I i druge) je zahtijevalo veću vlačnu čvrstoću, kao i veću posmičnu čvrstoću UB. Prema<sup>4</sup>, kod spojnica preko kojih je *blagovremeno ugrađen novi sloj* (zrelosti do cca 600 °Ch), posmična čvrstoća je 0,7-1,4 MPa, čak i kod mršavih mješavina. Koeficijent trenja najčešće iznosi od 1,0-1,4. Za početne faze projektiranja preporučuje se posmična čvrstoća od 0,7 MPa i koeficijent trenja 1,0. Ove vrijednosti mogu se povećati ili smanjiti, u ovisnosti od kvalitete agregata.<sup>11</sup>

U novijim branama visine 270-280 m, broj spojnica je čak 900 i više. Zbog velikih brzina ugradbe, noćnog rada i potrebe pripreme površine sloja za brzu ugradbu narednog sloja, postoji stalna opasnost da se dogode greške, pa je velika odgovornost nadzornog inženjera koji treba osigurati da se svaka spojnica slojeva pravilno napravi.

Koeficijent trenja u spojnicaama kod kojih je naredni sloj *nanijet nakon očvršćavanja prethodnog sloja* ovisi od hrapavosti prethodnog i ugradivosti narednog sloja. Ako posmična čvrstoća u spojnici iznosi 50-75% od posmične čvrstoće u sloju, koeficijent trenja u spojnicaama sa vezivnim mortom iznosi od 0,70-1,05.<sup>11</sup>

Pojava pukotina u gravitacijskim branama od UB narušava izgled brane, smanjuje trajnost i povećava procjeđivanje, pa je neophodna stroga kontrola njihove pojave, naročito onih koje se prostiru po čitavoj visini i širini brane, od uzvodnog do nizvodnog lica. *Transverzalne razdjelnice* predstavljaju glavnu konstruktivnu mjeru kojom se sprječava pojava pukotina uslijed termičkih vlačnih napona. One se postavljaju u ravnima upravnim na osu brane na rastojanju manjem od *kritičnog rastojanja*, čime se ograničavaju naponi i onemogućava pojava pukotina uslijed utjecaja temperature. Razdjelnice se postavljaju:

- na mjestima gdje se značajno mijenja oblik pregradnog profila;
- sa obje strane preljevnog dijela brane;
- na mjestima gdje postoje značajne razlike u betoniranju.<sup>7,11</sup>

U početku građenja brana od UB, naročito u SAD, smatralo se da uporaba razdjelnica nije neophodna<sup>6</sup>, jer je zbog manje količine cementa i dodatka pucolana znatno manja hidratacijska toplina. Sve UB brane u SAD do 1988. godine su izgrađene bez razdjelnica, pa su se na branama Willow Creek, Middle Fork, Winchester, Galesville, i drugim branama, pojavile brojne pukotine i procjeđivanje, čija je kontrola jedan od glavnih zadataka prilikom projektiranja brana od UB. Pukotine su se najčešće javljale poslije iznenadnih padova vanjskih temperatura neposredno nakon završetka građenja, ili za vrijeme prekida betoniranja. Obično su se obično javljale na mjestima diskontinuiteta (promjene u poprečnom presjeku, ispusti, i sl.). Pravac pružanja pukotina je bio od uzvodne ka nizvodnoj konturi. Procjeđivanje je bilo umjereno, ali relativno veliko u usporedbi sa procjeđivanjem kroz tijelo brane i horizontalne spojnice. Mjere za smanjenje vodopropusnosti (tretman pukotina na



uzvodnom licu, injektiranje brane, i sl.) su davale izvjesne rezultate, ali ga nisu mogle potpuno eliminirati. Uslijed kalcifikacije i/ili zapunjavanja pukotina finim česticama nanosa iz akumulacije, procjeđivanje je po pravilu bilo znatno manje poslije izvjesnog razdoblja eksploatacije.<sup>11</sup>

Procjeđivanje može biti kroz sredinu u kojoj je brana fundirana, ili kroz tijelo brane. Procjeđivanje kroz sredinu kontrolira se najprije izborom pregradnog profila koji treba biti vododrživ, od materijala s malim koeficijentima vodopropusnosti. Da bi se onemogućilo procjeđivanje kroz tijelo brane, odnosno da bi se svelo na najmanju mjeru, treba osigurati odgovarajući sastav mješavine, dobro ugrađivanje slojeva i kvalitetnu vezu u horizontalnim spojnica. Također, termičkim proračunom i postavljanjem transverzalnih razdjelnica treba spriječiti pojavu pukotina. Ovo su mjere koje su sastavni dio svakog projekta. Dodatne mjere za kontrolu procjeđivanja su: građenje uzvodne konture od hidrotehničkog KB, postavljanje vodonepropusne membrane na uzvodnom licu, obrada horizontalnih spojnica vezivnim mortom, uporaba kvalitetnijeg UB na uzvodnom dijelu brane i izrada drenažnih bušotina i drenažne galerije u tijelu brane.<sup>11</sup>

## 4. 10 POSEBNIH PROJEKATA UB BRANA U SVIJETU

### 4.1. Shimajigawa, Japan - prva UB brana u svijetu<sup>29</sup>

Brana Shimajigawa na rijeci Shimaji u Japanu je prva UB brana u svijetu. Projekt građenja brane je realiziran u razdoblju od 15.09.1976. godine do 26.03.1981. godine sa ukupno 317.000 m<sup>3</sup> betona, od čega na UB otpada 165.000 m<sup>3</sup> UB, ugrađenog u razdoblju od 25.10.1978. godine do 28.04.1980. godine. Brana visine 81 m, duljine u kruni 240 m, je građena *RCD metodom*, sa 120 kg/m<sup>3</sup> veziva (84 cementa + 36 pucolana). Beton je ugrađivan u slojevima debljine 15-20 cm i zbijan u etažama debljine 50-70 cm.



Slike 3.-4. Brana Shimajigawa, Japan, prva UB brana u svijetu<sup>29</sup>

### 4.2. Willow Creek, SAD - prva UB brana u potpunosti od UB<sup>29</sup>

UB brana Willow Creek na istoimenoj rijeci u SAD je prva brana izgrađena u potpunosti od UB, ujedno druga izgrađena UB brana u svijetu. Građena je u razdoblju od 6.11.1981. godine do 1.04.1983. godine. UB u količini od 331.000 m<sup>3</sup> ugrađen je za nepunih 5 mjeseci, u razdoblju od 29.04. do 24.09.1982. godine. UB je ugrađivan i zbijan u slojevima debljine 30 cm sa malim udjelom veziva od 66 kg/m<sup>3</sup> (47 cement + 19 pucolan).





Slike 5.-6. Brana Willow Creek, SAD, prva UB brana u svijetu izgrađena potpuno od UB: Detalj građenja (lijevo); pogled na izgrađenu branu (desno)<sup>29</sup>

#### 4.3. Tamagawa, Japan - prva UB brana visine 100 m<sup>29</sup>

Brana Tamagawa na rijeci Tama u Japanu je prva UB brana u svijetu visine 100 m. Projekt građenja brane je realiziran u razdoblju od 1.08.1980. godine do 31.12.1990. godine sa ukupno 1,150.000 m<sup>3</sup> betona, od čega na UB otpada 772.000 m<sup>3</sup> UB, ugrađenog u razdoblju od 1.09.1983. godine do 31.07.1986. godine. Brana visine 100 m, duljine u kruni 441 m, je građena *RCD metodom*, sa 130 kg/m<sup>3</sup> veziva (91 cementa + 39 pucolana). Beton je ugrađivan u slojevima debljine 15-20 cm i zbijan u debelim etažama debljine 75-100 cm.



Slike 7.-8. Brana Tamagawa, Japan, prva UB brana u svijetu visine 100 m<sup>29</sup>

#### 4.4. Upper Stillwater, SAD - prva UB brana sa preko 1 milijun m<sup>3</sup> UB s visokim sadržajem veziva i visokom brzinom ugradbe UB<sup>29,30,31</sup>

UB brana Upper Stillwater brana na rijeci Rock Creek u Juti (Utah), SAD, je bila prva UB brana sa preko 1 milijun m<sup>3</sup> UB, a građena je od 1.12.1983. godine do 31.12.1987. godine. Projektant je bio USBR (U.S. Bureau of Reclamation). Brana je 815 m duljine u kruni, visoka 91 m i ima 200 m dugačak i 90 m visok stepenasti preljev. Više od dvadeset godina to je bila najbrže izgrađena UB brana i UB brana sa najvećom prosječnom mjesečnom brzinom



građenja, da bi je prije desetak godina pretekla UB brana Longtan u Kini, prva UB brana viša od 200 m.



Slike 9.-10. Brana Upper Stillwater, SAD: detalj preljeva (lijevo); pogled iz zraka (desno)<sup>29</sup>

Ukupna količina betona je bila 1,281.000 m<sup>3</sup>, od čega na UB otpada 1,125.000 m<sup>3</sup>. Ugradba UB u slojevima debljine 30 cm je trajala 9 mjeseci, s prosječnom brzinom ugradbe od 125.324 m<sup>3</sup>/mjesec (mjesečni maksimum 204.430 m<sup>3</sup>), što je i nakon 30 godina druga najveća postignuta brzina ugradbe UB u svijetu. Maksimalna dnevna brzina ugradbe UB je iznosila 8.415 m<sup>3</sup>. Budući da se brana nalazi na u stjenovitim planinama na nadmorskoj visini od 2.500 m n.m., ogromne temperaturne varijacije su skratile građevnu sezonu ugradbe UB na maksimalno 5-5,5 mjeseci godišnje (tijekom 1986. godine - samo 4,5 mjeseca). Stoga je ugradba UB trajala od 29.09.1985. do 10.08.1987. godine. Tijekom radne sezone 1986. godine 539.400 m<sup>3</sup> uspješno je ugrađeno za samo 128 dana.



Slike 11.-12. Ugradba UB na UB brani Upper Stillwater, SAD<sup>23,29</sup>

Zanimljivo je da receptura UB mješavine za UB branu Upper Stillwater, sa najvećom količinom ukupnog veziva (252 kg/m<sup>3</sup>), od čega 173 kg/m<sup>3</sup> pucolana (68,7% ukupnog veziva), u značajnoj mjeri odgovara recepturi čuvenog rimskog vojnog graditelja i arhitekta Vitruviusa:

- 40% Portland cementa (sa istom komponentom kalcij hidroksida prilikom procesa hidratacije - kao i kod dijela vlažnog vapna antičkog betona);
- 60% LP (sa istim amorfnim silicijem - kao i kod vulkanskog pucolana antičkog betona);
- malo vode (za dobivanje rastresitog betona, transportiranog damperima, razastrtog u slojevima i zbijenog vibracijskim valjcima), kao i kod skoro suhe mješavine antičkog betona nošene u pletenim košaricama, razastrtog u slojevima i izlupanog specijalnim alatcima korištenim za izradu zidova cisterni za vodu);
- održavanog vlažnim (putem uređaja za raspršivanje vode bez stvaranja lokvi i pokrivanjem



- kao i kod antičkog betona pokrivenog i prskanog vodom), što ukazuje na dvotisućljetnu starost UB. O tome je prvi izvijestio prof. David Moore 1993. godine, a 1995. godine i javno objavio.<sup>8,13,14</sup>

#### 4.5. Shapai, Kina - dvostruko zakrivljena lučna UB brana<sup>29</sup>

Brana Shapai na rijeci Caopohe u Kini je lučna brana, izgrađena gotovo potpuno od UB (380.000 m<sup>3</sup> UB od ukupno 383.000 m<sup>3</sup> betona). Brana je građena od 16.06.1997. godine do 1.04.2003. godine, a ugradba UB je bila u razdoblju od 29.03.2000. do 30.05.2002. godine (26 mjeseci). Visina UB brane je 130 m, a duljina u kruni 250 m. UB je ugrađivan u slojevima debljine 30 cm, sa dvije recepture veziva: 108 kg/m<sup>3</sup> cementa + 72 kg/m<sup>3</sup> pucolana, odnosno 89 kg/m<sup>3</sup> cementa + 89 kg/m<sup>3</sup> pucolana.

Dvostruko zakrivljena lučna građevina ima debljinu u osnovi od 28 m. Prema Dunstan-u je posebno zanimljiva zbog blizine epicentra potresa u Sichuanu, kada je ubrzanje na kruni brane bilo 1 g, što je daleko iznad projektirane vrijednosti. Međutim, na brani nije bilo nijedne pukotine.



Slike 13.-14. Brana Shapai u Kini: ugradba UB (lijevo); završena brana (desno)<sup>29</sup>

#### 4.6. Olivenhain, SAD - UB brana sa rekordnom brzinom ugradbe UB<sup>29,31</sup>

UB brana Olivenhain na rijeci Escondido Creek, SAD, izgrađena je u od 13.06.2001. godine do 3.07.2003. godine, s ciljem akumuliranja vode za opskrbe San Diega u hitnim slučajevima. Brana visine 97 m, duljine u kruni 788 m, imala je ukupnu količinu betona od 1,140.000 m<sup>3</sup>, od čega čak 1,070.000 m<sup>3</sup> UB.



Slike 15.-16. UB brana Olivenhain u SAD (lijevo); velika brzina ugradbe UB na istoj brani (desno)<sup>29</sup>

UB je ugrađen za 8,8 mjeseci, od 4.02. do 31.10.2002. godine, uz 4. prosječnu mjesečnu brzinu ugradbe UB od čak 121.895 m<sup>3</sup>/mjesec i mjesečni maksimum od 224.675 m<sup>3</sup>, te dnevni maksimum od čak 12.250 m<sup>3</sup>. UB je ugrađivan u slojevima debljine 30 cm, sa 74 kg/m<sup>3</sup> cementa + 121 kg/m<sup>3</sup> pucolana.

#### 4.7. Yeywa, Myanmar - prva velika UB brana sa prirodnim pucolanom u vezivu<sup>29,31</sup>

UB brana Yeywa na rijeci Myitnge u Mianmaru, visine 135 m, duljine u kruni 68 m, prva je velika UB brana koja je koristila prirodni pucolan, umjesto umjetnog pepela. Korišten je vulkanski pepeo s Mount Popa, kojeg je bilo u skoro beskrajno velikim količinama izvanredno dobre kvalitete. Građenje je trajalo od 1.12.2002. godine do 30.12.2010. godine, odnosno punih 9 godina.

U razdoblju od 8.02.2006. godine do 15.12.2008. godine (34,3 mjeseci) ugrađeno je čak 2,473.000 m<sup>3</sup> UB (2,483.000 m<sup>3</sup> betona). Ugradba UB je završila 5,5 mjeseci prije planiranog roka. Prosječna ostvarena mjesečna brzina ugradbe UB je donedavno bila 12. na svijetu i iznosi 72.247 m<sup>3</sup> (mjesečni maksimum 147.320 m<sup>3</sup>), uz dnevni maksimum od 7.555 m<sup>3</sup>. Samo 13 radnika je trebalo ugraditi oko 8.000 m<sup>3</sup> UB dnevno. UB je ugrađivan u slojevima debljine 30 cm, a mješavina UB je imala 75 kg/m<sup>3</sup> cementa i 145 kg/m<sup>3</sup> pepela.



Slike 17.-18. UB brana Yeywa u Myanmaru: pogled (lijevo), detalj ugradbe UB 1 etaža dnevno preko cijele površine brane, što je povećalo brzinu ugradbe UB<sup>29</sup>



#### 4.8. UB brane Son La i Lai Chau, Vijetnam - UB brane sa tretiranim lebdećim pepelom u vezivu<sup>29,30</sup>

UB brana Son La na rijeci Sond Da (Crna rijeka) u Vijetnamu, ostat će zapamćena kao prvi veliki projekt u Vijetnamu koji je završen na vrijeme i u okviru planiranih sredstava. UB brana je visine 138 m i duljine u kruni 962 m. UB brana je građena od 1.04.2004. godine do 30.12.2012. godine, s ukupnom količinom betona od čak 4,800.000 m<sup>3</sup>. Vijetnamski premijer bio je toliko impresioniran da je odredio sljedeću branu koja će biti izgrađena uzvodno u Lai Chau, s istim izvođačem. UB brana je visine 131 m, duljine u kruni 620 m, sa 2,500.000 m<sup>3</sup> betona.

UB na brani Son La u količini od 2,677.000 m<sup>3</sup> je ugrađen u razdoblju od 11.01.2008. do 26.08.2010. godine (31,5 mjesec), a UB na brani Lai Chau u količini od 1,884.000 m<sup>3</sup> je ugrađen u razdoblju od 7.03.2013. godine do 2.05.2015. godine, odnosno za 26 mjeseci. Prosječna mjesečna brzina ugradbe UB je bila donedavno 8. na svijetu i iznosila je 84.984 m<sup>3</sup> (mjesečni maksimum 200.075 m<sup>3</sup>), uz dnevni maksimum od 9.980 m<sup>3</sup>.



Slike 21.-22. UB brana Son La (lijevo), UB brana Lai Chau (desno), obje u Vijetnamu<sup>29</sup>

U prvom mjesecu ugradbe UB na drugoj brani ugrađeno je čak 152.000 m<sup>3</sup> UB, što je vjerojatno i sada svjetski rekord za količinu UB ugrađenog prvog mjeseca ugradbe. Do kraja godine, koja je uključivala 5 kišnih mjeseci koji su prepолоvili brzinu ugradbe UB, ugrađeno je preko 1 milijun m<sup>3</sup> UB, u prosjeku od 150.000 m<sup>3</sup> do 180.000 m<sup>3</sup> UB.



Slike 23.-24. Ugradba UB: UB brana Son La (lijevo) i UB brana Lai Chau (desno)<sup>29</sup>



Na obje brane UB je ugrađivan u slojevima debljine 30 cm, sa 60 kg/m<sup>3</sup> cementa + 160 kg/m<sup>3</sup> pucolana. UB brana Son La je prva u svijetu koja je koristila tretirani lebedći pepeo u vezivu. Lebedći pepeo iz vijetnamskih elektrana je bačen u ribnjake i tamo ležao više od 20 godina.

#### 4.9. Longtan, Kina - prva UB brana u svijetu visine preko 200 m<sup>29,31</sup>

UB brana Longtan na rijeci Hongshui u Kini, visine 217 m, duljine u kruni 832 m, sa ukupno 7,548.000 m<sup>3</sup> betona, je građena u razdoblju od 1.07.2001. godine do 31.12.2009. godine, dakle 8,5 godina.

UB u količini od čak 4,952.000 m<sup>3</sup> UB je ugrađivan u razdoblju od 8.10.2004. godine do 30.04.2008. godine, dakle nešto više od 3,5 godine, postignutu rekordnu prosječnu brzinu mjesečne ugradbe UB u svijetu, koja je iznosila 142.758 m<sup>3</sup>, uz mjesečni maksimum od čak 400.755 m<sup>3</sup>, te dnevni maksimum od čak 18.475 m<sup>3</sup>.



Slike 25.-26. UB brana Longtan u Kini: pogled (lijevo); detalj ugradbe UB (desno)<sup>29</sup>

#### 4.10. Gibe III, Etiopija - najviša UB brana na svijetu<sup>29</sup>

Trenutno najviša izgrađena UB brana na svijetu je brana Gibe III na rijeci Omo u Etiopiji, visine 246 m, duljine u kruni 630 m. Od 6,4 milijuna m<sup>3</sup> betona, čak 6,2 milijuna m<sup>3</sup> otpada na UB. Građenje brane je započelo 22.04.2008. godine, a u UB je ugrađivan u razdoblju od 18.12.2011. godine do 31.10.2015. godine (46,5 mjeseci), odnosno uz prosječnu brzinu ugradbe od čak 133.000 m<sup>3</sup> UB/ mjesечно. UB je ugrađivan u slojevima debljine 40 cm, uz 70-120 kg/m<sup>3</sup> cementa + 45-60 kg/m<sup>3</sup> pucolana. Projekt će biti okončan krajem 2018. godine.



Slike 27.-28. UB brana Gibe III u Etiopiji, najviša UB brana u svijetu: Ugradba UB (lijevo); pogled na najvišu UB brana na svijetu (desno)<sup>29</sup>



## 5. OSVRT NA UB BRANE U BIH I REGIJI

### 5.1. Brana HE Glavatičevo na r. Neretvi

U listopadu 1985. godine u bivšem EP "Hidroelektrane na Neretvi" sačinjen je Program usvajanja tehnologije UB, koji je kasnije prerastao u Istraživački projekt, u kojem je sudjelovao i autor ovog rada. Programom je predviđena realizacija manje eksperimentalne brane na rijeci Prači (BiH), čiji bi rezultati poslužili za dobivanje potrebnih parametara za projektiranje, građenje, kontrolu i oskultaciju brana od UB. U istom razdoblju objavljeno je već broj radova o tehnologiji UB u cilju informiranja stručne javnosti u poduzeću o novoj tehnologiji. Nekolicina radova objavljena je na 13. i 14. kongresu Jugoslavenskog društva za visoke brane (JDVB) u Mostaru (1986) i Strugi, Makedonija (1990). Autor rada je posebno razmatrao mogućnosti uporabe elektrofilterskih pepela iz BiH u UB, što je bio predmet obranjenog magistarskog rada 1995. godine na Građevinskom fakultetu u Zagrebu.

U jesen 1990. godine usvojen je i Idejni projekt brane HE "Glavatičevo" po tehnologiji UB, koja je trebala zamijeniti prvotno planiranu gravitacijsku branu od KB visine 169 m. Projekt je izradio „Energoinvest - Energoinžinjeri“, Sarajevo, na temelju prije usvojenog idejnog rješenja.<sup>27</sup>

Sa svojih 144 m visine i 1,259.500 m<sup>3</sup> volumena, brana HE "Glavatičevo" trebala se uvrstiti u sam svjetski vrh brana od UB. Prema Projektu<sup>27</sup>, maksimalna širina temeljne stope je 103,30 m, uzvodno lice je vertikalno, a nizvodno u nagibu 1:0,82. Duljina brane u kruni iznosi 377,0 m, a širina 6,0 m. U ukupnom volumenu betona brane, UB je trebao sudjelovati sa 1,137.200 m<sup>3</sup> (90,3%), KB sa 96.000 m<sup>3</sup> (7,6%), armirano-betonski prefabricirani elementi sa 15.100 m<sup>3</sup> (1,2%) i cementni kontaktni mort (širine 3,0 m u gornjem i 5,0 m u donjem dijelu) sa 11.200 m<sup>3</sup> (0,9%).<sup>27,17</sup>

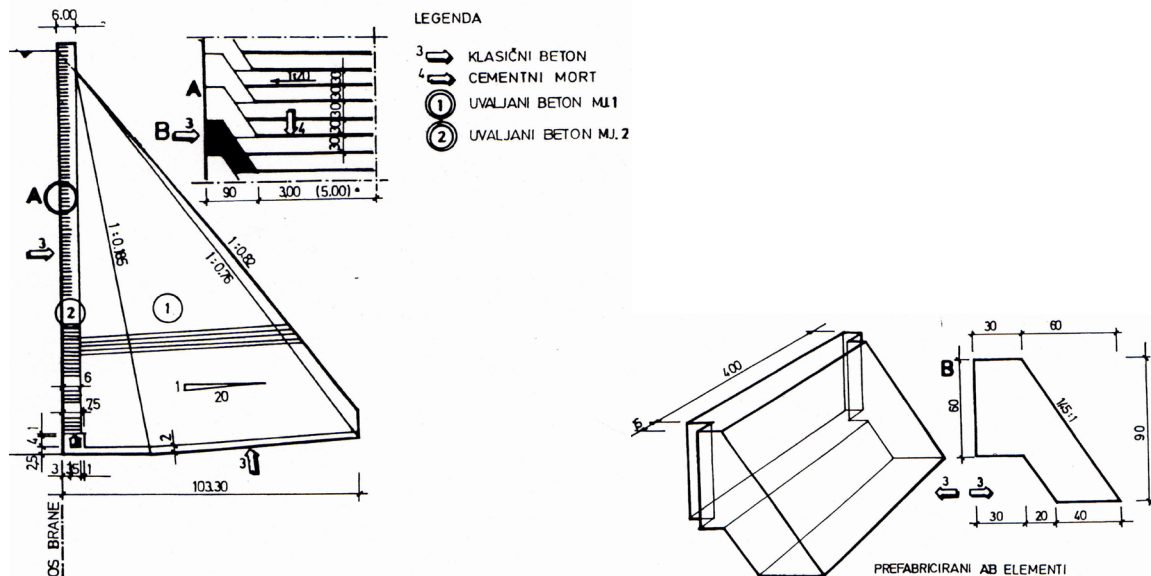
Predviđene su dvije mješavine UB:

- Mješavina br. 1: za središnji dio brane, volumena 1,013.700 m<sup>3</sup> UB (89,1 % UB, odnosno 80,5 % volumena brane) sa 140 kg/m<sup>3</sup> veziva (60 cementa + 80 lebdećeg pepela), i
- Mješavina br. 2: za nizvodno lice, volumena 123.500 m<sup>3</sup> (10,9 % UB, odnosno 9,8 % volumena brane), sa 180 kg/m<sup>3</sup> veziva (80 cementa + 100 lebdećeg pepela).<sup>27,17</sup>

Tablica 1. Projektirani sadržaj komponenti mješavina UB za UB branu HE Glavatičevo<sup>27,17</sup>

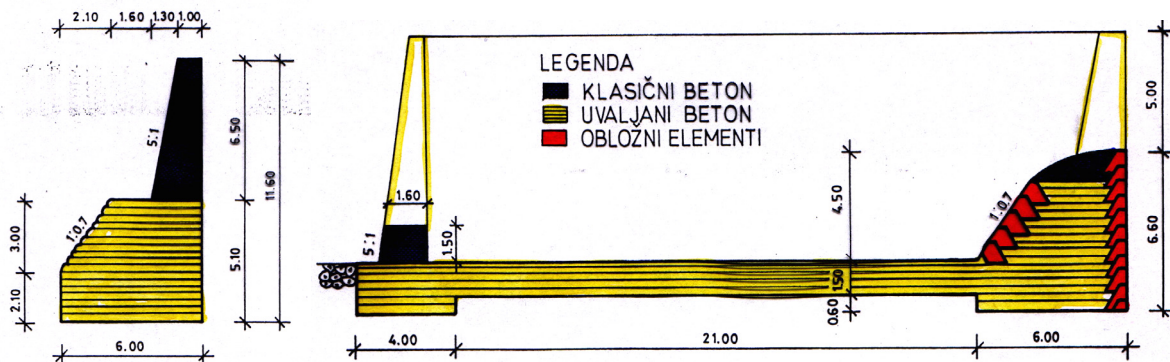
Mješavina	Sadržaj komponenti (kg/m <sup>3</sup> )				
	Cement	Lebdeći pepeo	Voda	Sitan agregat	Krupan agregat
1	60	80	100	650	1.560
2	80	100	100	700	1.430

Karakteristika mješavina je visok sadržaj lebdećeg pepela u vezivu (56-57 % mase veziva), što ih približava "masnijim" mješavinama UB.<sup>27,17</sup>

Slika 29. Poprečni presjek brane HE Glavatičevo (lijevo), sa detaljima (desno)<sup>27,17</sup>

## 5.2. Bujična pregrada na r. Prači

Uoči početka rata napravljen je projekt bujične pregrade na r. Prači (Selimović, Dasović, Šaravanja), visine 11,5 m i volumena 1.500 m<sup>3</sup>, kao prototip primjene UB prije početka građenja HE Glavatičevo. Nažalost, zbog rata nije realiziran.<sup>18</sup>

Slika 30. Pregrada br. 2 od UB na km 4+490 na r. Prači (BiH)<sup>18</sup>

Projektom HE "Lešće" u Republici Hrvatskoj, u sklopu rješenja osiguranja građevne jame brane i strojarnice, predviđeno je bilo izvođenje uzvodnog zagata od uvaljanog betona. Pri izradi rješenja glavne brane razmatrana je i varijanta od UB. Zbog nedostatka iskustva u građenju ovakvih objekata odustalo se od te varijante, ali se, ipak, pristupilo projektiranju uzvodnog zagata od UB. Odgovorni projektant je bio Nikifor Petrović. Projektom je predviđeno korištenje mršavog UB, sa 120 kg veziva/m<sup>3</sup> ugrađenog betona i sa drobljenim vapnenačkim agregatom, maksimalnog zrna 63 mm. Na uzvodnom licu projektom je predviđen ekran od armiranog mlaznog betona.<sup>18</sup>

Osnovni tehnički podaci o uzvodnom zagatu HE "Lešće": maksimalna visina - 15,0 m, ukupni volumen UB - 7.300 m<sup>3</sup>, duljina u kruni - 74,8 m, širina u kruni - 3,5 m, nagib nizvodnog lica - 1:0,8, a nagib uzvodnog lica - 10:1.





Krajem 2016. godine izgrađena je brana Bogovina na rijeci Crni Timok u Srbiji, čiji je projektant bio Institut „Jaroslav Černi“ iz Beograda. Cjelokupan projekt je trajao 5 godina, a ugradba UB je vršena tijekom 2014. i 2015. godine. Brana je visine 54 m, sa 175.000 m<sup>3</sup> UB, od ukupno 305.000 m<sup>3</sup> betona. Duljina brane u kruni je 396 m.<sup>29</sup>

## 6. ZAKLJUČNA RAZMIŠLJANJA

Tehnologija građenja UB brana započela je nakon 1980. godine, da bi već krajem 1980-tih i tijekom 1990-tih godina postala sve masovnija. Osnovne prednosti UB brana u odnosu na brane od KB su niža jedinična cijena, kraće vrijeme građenja (zbog građenja mehanizacijom za nasute brane) i uštede u cijeni oplata zbog građenja u slojevima, a ne u blokovima. Kod projektiranja UB brane obično se polazi od brane minimalnog volumena izgrađene od skupljeg UB, a završava se sa UB branom većeg volumena izgrađene od jeftinijeg UB. Nizak sadržaj veziva i mehanizirana ugradba UB relativno niske cijene (30-40 \$)/m<sup>3</sup> tijela brane, bila je ispod polovine (čak i do trećine) cijene ugradbe KB.

U početku su građene samo gravitacijske UB brane, ali kasnije su građene i lučno-gravitacijske UB brane s visinama do 80 m, zajedno s tankim lučnim UB branama slične visine.

Najviše UB brana izgrađeno je u Kini, Japanu, SAD, Španjolskoj i Brazilu, u nekima čak po pedesetak UB brana. Ub brane su u uporabi, u fazi građenja ili u fazi projektiranja u raznim zemljama koje imaju klimu u rasponu od arktičke do tropske i nalaze se na visinama od razine mora do vrlo visokih planinskih područja.

Od nekadašnjih probnih dionica i manjih brana u početku, došlo se do gravitacijskih UB brana visina preko 250 m, sa nekoliko milijuna m<sup>3</sup> UB. Uz izgrađene UB brane više od 200 m: Longtan i Guangzhao u Kini, Gibe III u Etiopiji, projekti sličnih UB brana koji su u fazi građenja su: Huangdeng na rijeci Langcang u Kini, visine 202 m (planirani završetak 2020. godine), dok je građenje dviju jako visokih UB brana na rijeci Indus u Pakistanu: Diemer-Bhasha, visine 272 m (12,8 milijuna m<sup>3</sup> UB od 13,5 milijuna m<sup>3</sup> betona) i Dasu, visine 242 m, upravo započelo, s planiranim rokom završetka brane Diemer-Bhasha 2019. godine. Planiran je i projekt do sada najviše UB brane u svijetu - brane Boko Abo u Etiopiji, visine 280 m, sa 12,2 milijuna m<sup>3</sup> UB (od 13 milijuna m<sup>3</sup> betona).<sup>30</sup>

Tijekom desetljeća građenja UB brana napravljen je pomak od mršavih mješavina UB prema onima sa većim sadržajem veziva, uz zamjenu sve većeg dijela cementa pucolanom. Iako su korišteni razni, prvenstveno umjetni pucolani, u najvećem broju slučajeva riječ je o lebdećim pepelima sa niskim sadržajem CaO.

Iako je svaka brana jedinstven objekt sa svojim specifičnostima, nakon više stotina izgrađenih UB brana, stečeno je dovoljno iskustva za definiranje čimbenika koji utječu na brzinu ugradbe UB, kao najveću prednost tehnologije UB. UB brane su rasle brzinom od 60 cm (2 sloja po 30 cm) dnevno, omogućivši da UB brana visine 200 m bude izgrađena za manje od godine dana. Brzina ugradbe može varirati i do 3 puta, a u nekim najekstremnijim slučajevima čak i do 5 puta. Ovakvo skraćivanje roka građenja budućem vlasniku omogućuje raniji povrat ulaganja. U nekim projektima UB brana u Indiji to je bilo jednako čak polovici troškova cijelog projekta.

Da bi se što bolje iskoristila tehnologija građenja UB brana, njihovo projektiranje i građenje treba cjelovito sagledavati. Pravilnim izborom oblika poprečnog presjeka UB brane, tehnologije građenja i sastava mješavine UB, UB brane postaju povoljnije od ostalih vrsta



brana (brane od KB, te nasute brane od zemlje ili kamenog nabačaja). Uskoro će ne samo tradicionalne betonske brane, već i brojne nasute brane od kamenog nabačaja, biti zamijenjene UB branama.

Istraživanja tijekom zadnjeg desetljeća su dovela do jeftinije novije UB brane sa zakošenijom uzvodnom konturom, minimalnom količinom cementa i jeftinim lokalnim agregatom, u odnosu na UB branu sa klasičnim poprečnim presjekom i kvalitetnijim UB. Daljnja istraživanja dovela su do simetričnog poprečnog presjeka UB brana sa nagibima obiju kontura od 1:0,7, čime je potpuno eliminirana pojava vlačnih napona. Uporabom jeftinog agregata i male količine cementa, sa membranom na uzvodnom licu brane kojom se rješava problem vodopropusnosti, dobiven je tzv. "hardfill" tip UB brana. Proračun napona uslijed potresa, ili uslijed iznimnog opterećenja od vode, pokazao je značajne prednosti ovog tipa brane u odnosu na UB branu klasičnog poprečnog presjeka. Dodatna prednost je da se ovaj tip može koristiti i za temeljenje u stijenama vrlo slabih mehaničkih karakteristika. Pravilnim izborom oblika poprečnog presjeka UB brane, tehnologije građenja i sastava mješavine UB, UB brane postaju povoljnije od ostalih vrsta brana (brane od KB, te nasute brane od zemlje ili kamenog nabačaja).

Da bi se onemogućilo procjeđivanje kroz tijelo brane, odnosno da bi se svelo na najmanju mjeru, treba osigurati odgovarajući sastav mješavine UB, dobro ugrađivanje slojeva i kvalitetnu vezu u horizontalnim spojnica. Također, termičkim proračunom i postavljanjem transverzalnih razdjelnica, u pravcu uzvodno-nizvodno, treba spriječiti pojavu pukotina, a iskustva japanskih stručnjaka su pokazala da kod brana viših od cca 150 m može postojati i potreba za vertikalnim longitudinalnim razdjelnica - u pravcu ose brane. Položaj ostalih razdjelnica proističe iz termičkog proračuna. Zbog toga se građenje ovakvih brana može predvidjeti u fazama, pri čemu spoj dijelova konstrukcije I. i II. faze predstavlja longitudinalnu razdjelnicu.

Realizacija projekta UB brane zahtijeva dobar plan koji će, osim aktivnosti izvođenja, precizno tretirati područje inženjeringa, opremu gradilišta postrojenjima i dopremu materijala. Organizacija radne snage, funkcioniranje opreme i strojeva, kao i proizvodnja materijala na gradilištu kritični su parametri ugradbe UB. Tijek ovih operacija je jako brz da bi se postigle pune prednosti tehnologije UB. U kontinuiranim operacijama kod UB građevina vremenska rezerva ne postoji, pa pucanje jedne karike znači prekid građenja.

## LITERATURA

1. 1997. *Roller Compacted Concrete, RCC for dams*, Paris: French National Research Project BaCaRa
2. 2000. *The Gravity Dam a Dam for the Future*, Paris: ICOLD Committee of Cost
3. 2015. *Smjernice za kolničke konstrukcije izvedene uvaljanom betonom*, Zagreb: Institut IGH d.d.
4. Andriolo, F. R. 1998. *The Use of Roller Compacted Concrete*, São Paulo-Brazil
5. Bjegović, D., Beslač, J., Banjad Pečur, I. *Betonski kolnici u svijetu i u nas*, Četvrti hrvatski kongres o cestama, Cavtat-Dubrovnik, Hrvatska, 2007.
6. Hansen, K. D., Reinhardt, W. G. 1997. *Roller Compacted Concrete Dams*, McGraw-Hill
7. Pan, J., He J. 2000. *Large Dams in China a Fifty-Year Review*, Beijing: China Water Power Press
8. Dunstan, M.R.H. 2002. *RCC Dams, 2002*, Hydropower & Dams World Atlas, 2002.



9. Kuzmanović, V., Savić, Lj., Milovanović, B. 2003. *Primena valjanog betona u izgradnji brana I. deo - istorijski razvoj*, Beograd: Vodoprivreda 0350-0519, 35, 203-204, p. 231-247
10. Kuzmanović, V., Savić, Lj., Milovanović, B. 2003. *Primena valjanog betona u izgradnji brana II. deo - komponente i osobine valjanog betona*, Beograd: Vodoprivreda 0350-0519, 35, 205-206, p. 371-386
11. Kuzmanović, V., Savić, Lj., Milovanović, B. 2004. *Primena valjanog betona u izgradnji brana III. deo - projektovanje*, Beograd: Vodoprivreda 0350-0519, 36, 211-212, p. 405-420
12. Kuzmanović, V., Savić, Lj., Milovanović, B. 2004. *Primena valjanog betona u izgradnji brana IV. deo - građenje, kontrola kvalitete i ekonomski aspekti*, Beograd: Vodoprivreda 0350-0519, 37, 213-215, p. 95-111
13. Moore, D., *The Riddle of Ancient Roman Concrete ("The Spillway" – newsletter of the US Dept of the Interior, Bureau of Reclamation, Upper Colorado Region, February, 1993)*, 1995.
14. Petković, M. D. 2015. Prilog savremenom srpskom neimarstvu - deo 5/1 Valjkom zbijeni beton - pojam i istorijat, Subotica: Međunarodna konferencija „Savremena dostignuća u građevinarstvu“, p. 859-867
15. Selimović, M., Šaravanja, K., Rogić, V., Dasović, D. i Zebić, S. 1989. *Pristup istraživanju i primjeni uvaljanog betona za brane*, Struga: Saopćenja s 14. kongresa JDVB, Knjiga 1
16. Šaravanja, K., Dasović, D. i dr. 1989. *Studija o uvaljanom betonu, literaturni pregled, Knjiga 1*, Mostar: RO Hidroelektrane na Neretvi, Jablanica, OOUR Institut za studijsko-razvojne poslove, Mostar
17. Šaravanja, K. i Dasović, D. 1993. *Tehnologija uvaljanog betona za izgradnju brana i kolovoza s osvrtom na branu HE Glavatićevo na r. Neretvi*, Neum: Zbornik radova znanstveno-stručnog skupa „Pravci razvoja HZ H-B“, Sveučilište u Mostaru
18. Šaravanja, K. 1995. *Uvaljani beton s posebnim osvrtom na mogućnosti korištenja elektrofilterskih pepela*, Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu - magistarski rad
19. Šaravanja, K. 1996. *Uvaljani beton za građenje brana*, Zagreb: Časopis Hrvatskog društva građevinskih inženjera „Građevinar“, Vol. 48, No. 2
20. Šaravanja, K. 2001. *Tehnologija izvođenja brana i pripadajućih objekata od uvaljanog betona*, Mostar: „Znanstveni glasnik“ - časopis za prirodne i tehničke znanosti Sveučilišta u Mostaru, br. 10
21. Šaravanja, K. 2001. *Metode oblikovanja uzvodnih i nizvodnih lica brana od uvaljanog betona*, Mostar: Znanstveni glasnik časopis za prirodne i tehničke znanosti Sveučilišta u Mostaru, br. 10
22. Šaravanja, K. 2001. *Tehnologija uvaljanog betona za građenje brana i cesta*, Mostar: Zbornik Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru
23. Šaravanja, K. 2002. *Tehnologija uvaljanog betona za građenje brana i cesta*, Znanstveni sat Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru, 2002.
24. Šaravanja, K. 2002. *Obrada horizontalnih spojnica brana od uvaljanog betona*, Mostar: „Znanstveni glasnik“ - časopis za prirodne i tehničke znanosti Sveučilišta u Mostaru, br. 11
25. Šaravanja, K. 2005. *Kontrola kvalitete pri građenju uvaljanim betonom*, Sarajevo: Zbornik radova Skupa „Dani betona 2005“
26. Šaravanja, K., Kurtović, A. 2017. „Brane od (u)valjanog betona - jučer, danas, sutra“, III. Međunarodno naučno-stručna konferencija „Tehnologije betona“, Marketinška i izdavačka agencija „SFERA“ d.o.o. Mostar, Građevinski fakultet Univerziteta „Džemal Bijedić“ Mostar, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Tehnološki fakultet Univerziteta u Tuzli i Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, 23.-24. III. 2017.



27. GORNJA NERETVA I HE GLAVATIČEVO Idejni projekat, Knjiga 1 PRIKAZ PROJEKTA HE GLAVATIČEVO, Energoinvest, Energoinžinjeri, Sarajevo, IX. 1990.
28. <https://www.masterbuilder.co.in/roller-compacted-concrete-dams-review/>
29. <http://www.rccdams.co.uk/dam-search/>
30. <http://www.waterpowermagazine.com/features/feature-4219225/>
31. <http://mmmhydropower.blogspot.ba/2012/05/rcc-dams-new-wave.html#!/2012/05/rcc-dams-new-wave.html>