

ISTRAŽIVAČKI PROJEKT *BLAST*PRIPREMILI:  
Ivan Radić, Hrvoje Draganić

# Otpornost stupova nadvožnjaka na djelovanje eksplozije

Glavni cilj istraživačkog projekta BLAST jest odrediti kapacitete za eksplozivna djelovanja za mostove izgrađene na hrvatskim autocestama određivanjem najčešće korištenog tipa stupa mosta te procjenom šteta prouzročenih detonacijom paketa s određenom količinom eksploziva postavljenih u automobilu ispod mosta

## Uvodne napomene i ciljevi projekta BLAST

Svjetski trend terorističkih napada u stalnom je porastu, a improvizirane eksplozivne naprave često su sredstvo napada. Do sada su ciljevi uglavnom bile zgrade od velike društvene i gospodarske važnosti jer njihovo uništavanje izaziva najveći strah. Međutim, prometna infrastruktura postaje sve atraktivnija meta jer njezino oštećenje ili uništenje, posebno mostova, može uzrokovati prometne probleme i izolaciju ključnih točaka. Konstantno nadgledanje i zaštita svih mostova na važnim prometnicama bilo bi nerealno i preskupo pa inženjeri moraju primijeniti razne metode proračuna kako bi osigurali određenu razinu otpornosti na eksplozivne učinke. Zbog toga je na Građevinskome i arhitektonskome fakultetu Sveučilišta Josipa Juraja Stro-

ssmayera u Osijeku od travnja 2018. do rujna 2023. u provedbi projekt BLAST čiji je primarni cilj odrediti otpornost mostova na hrvatskim autocestama na eksplozivne napade identificiranjem najčešćeg tipa mosta i procjenom štete uzrokovane detonacijom određene količine eksploziva smještenog u automobilu parkirano ispod mosta.

Projekt BLAST (UIP-2017-05-7041) uspostavlja je istraživački projekt koji sufinancira Hrvatska zaklade za znanost. Voditelj je projekta izv. prof. dr. sc. Hrvoje Draganić, a istraživački tim čini još osam djelatnika Građevinskoga i arhitektonskoga fakulteta u Osijeku, i to prof. dr. sc. Marijana Hadzima Nyarko, izv. prof. dr. sc. Mario Galić, izv. prof. dr. sc. Goran Gazić, izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus, izv. prof. dr. sc. Ivan Radić, doc. dr. sc. Mario Jeleč, dr. sc. Adriana Brandis i dr. sc. Sanja Lukić. Vrijednost projekta iznosi približno 200 000

eur. Eksperimentalna istraživanja provode se na vojnim poligonima u suradnji s Ministarstvom unutarnjih poslova Republike Hrvatske i Ministarstvom obrane Republike Hrvatske koji osiguravaju potrebne količine eksploziva i osoblje osposobljeno za rukovanje eksplozivom.

Prije provedbe eksperimentalnoga dijela projekta pregledani su svi dostupni arhivski podaci o mostovima i nadvožnjacima autocesta u Republici Hrvatskoj, što je omogućilo prikupljanje opće i detaljne informacije o vrsti, geometriji, korištenim materijalima, izgradnji i projektnim detaljima postojeće mostovne infrastrukture, a ti podaci implementirani su u preliminarnu numeričke modele i korišteni pri osmišljavanju eksperimentalnoga istraživanja, tj. pri definiranju količine eksploziva potrebne za postizanje ciljane razine oštećenja koja odgovara određenim grančnim stanjima definiranim u Eurokodu 8 (neposredna uporabljivost i prevencija rušenja).

## Provedba eksperimentalnoga dijela projekta

Eksperimentalni program podijeljen je u tri faze: mjerenje parametara eksplozije (detonacije), ispitivanje metode ojačanja i ispitivanje stupova nadvožnjaka.



Postav instrumenata za prvu fazu eksperimenta (lijevo) i vatrena kugla (engl. blast fireball) nakon detonacije (desno)



Nanos ojačanja na AB ploče (lijevo) i postavljanje instrumenata za drugu fazu eksperimenta (desno)

Tijekom prve faze eksperimentalnoga programa određuju se parametri eksplozije, a sastoji se od detoniranja prethodno određene količine eksploziva te mjerenja upadnih i reflektiranih tlakova zraka. Osim utjecaja mase i udaljenosti na tlakove eksplozije promatran je i utjecaj oblika eksplozivnoga naboja na tlak. Tijekom druge faze eksperimentalnoga programa provjeravaju se tri predložene metode ojačanja stupova kako bi se dobio uvid u učinkovitost povećanja otpornosti na djelovanje eksplozije. Izvedeno je ukupno 12 armiranobetonskih ploča. Tri su ploče ostavljene kao obične armiranobetonske, dok je na ostalih osam ploča nanoseno ojačanje. Kao ojačanje AB ploče upotrijebljena je staklena tkanina, i to u obliku pletene tkanine i suho lijepljene tkanine. Tkanina je lijepljena na ploče epoksidnim ljepilom. Nakon aplikacije ojačanja ploče su transportirane na poligon te deponirane na mikrolokaciji na kojoj je prethodno postavljena čelična potporna konstrukcija koja je služila za pridržavanje ploča tijekom ispitivanja. Naboj je pri ispitivanju bio ovješten iznad ploče te centriran kako bi se ploča ravnomjerno izložila djelovanju eksplozije. Tijekom ispitivanja nekoliko instrumenata postavljeno je na ploču te u njezinoj okolini kako bi se promatralo ponašanje pri djelovanju eksplozije.

Treća faza eksperimentalnoga programa odnosi se na ispitivanje stupova nadvožnjaka. Odabrani stup nadvožnjaka ispitivan je na djelovanje unaprijed definirane količine eksploziva smještene na pretpo-

stavljenoj udaljenosti od stupa. Eksperimentalni uzorci izrađeni su u mjerilu 1 : 3 i ukupne su visine 2,0 m jer kapacitet vojnoga poligona ograničava raspoloživu količinu eksploziva pa je u skladu s time smanjena i količina naboja i veličina stupa. Ispitivanje je provedeno na stupovima bez ojačanja te na stupovima s istim ojačanjem koje se pokazalo najboljim u skladu s prethodnom fazom eksperimentalnoga programa. Pri eksperimentalnome ispitivanju djelovanja eksplozije, a kako bi se mjerili podaci mjerodavni za analizu ponašanja stupa, senzori su postavljeni na stup i u njegovu okolicu. Budući da je AB stup kao pojedinačni element izdvojen iz konstrukcije, bilo je potrebno osigurati pravilne rubne uvjete koji će približno simulirati stanje u realnoj konstrukciji, što je omogućeno posebno projektiranom čeličnom potpornom konstrukcijom.

Osim eksperimentalnih istraživanja jedan od glavnih ciljeva projekta jest razviti

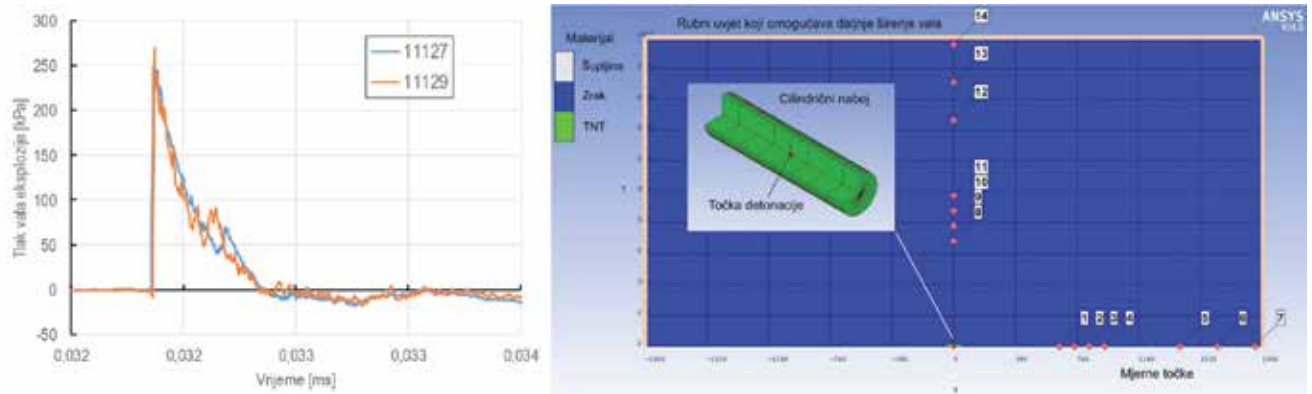
pouzdan i točan numerički model koji će se primjenjivati u daljnjim istraživanjima. Numerički modeli daju znatno jeftinije i brže rješenje nego eksperimentalno ispitivanje. Razvijeni numerički modeli pokazuju dobro slaganje s eksperimentalnim rezultatima oštećenja stupova te time upućuju na moguću primjenu takvih modela kod procjene ponašanja stupova. Završni je cilj sve tipove oštećenja stupa i/ili oblike otkazivanja katalogizirati i u skladu s dobivenim podacima dati prijedloge za moguća ojačanja stupova te buduće projektiranje.

### Rezultati istraživanja

Prema planu istraživanja pregledana je arhivska građa *Hrvatskih cesta i Hrvatskih autocesta* te su iz dostupnih projekata izdvojeni podaci o stupovima nadvožnjaka. Na temelju prikupljenih podataka izvedeni su preliminarni numerički modeli u Ansys Autodyn, softveru s mogućnošću



Izvedba, njega i nanos ojačanja na stupove (lijevo i sredina) te postav za treću fazu eksperimenta (desno)



Dijagram mjerenaog tlaka za bočne senzore (lijevo) i numerički model eksperimenta (desno)

dinamičke analize interakcije fluida i krutina (konstrukcija). Prva faza modeliranja sastojala se od jednostavnih modela stupova prikupljenih poprečnih presjeka izloženih djelovanju eksplozije kako bi se utvrdio proces širenja i djelovanja vala eksplozije oko stupa i na njega. U drugoj fazi, nakon što je određen profil tlaka vala eksplozije po visini stupa, oformljen je numerički model s pretpostavljenim količinama eksploziva kako bi se preliminarno odredio tip oštećenja stupa te napravile pravodobne prilagodbe u količinama eksploziva.

U prvoj fazi eksperimentalnoga dijela istraživanja eksperimentalne detonacije i mjerenja provedena su za dvije različite vrste eksploziva: TNT i PEP500. Nabojji različitih masa i oblika (valjak, kvadar i kugla) postavljeni su na stalak visine jedan metar iznad tla, a u razini naboja na određenoj udaljenosti postavljeni su

senzori za mjerenje tlaka vala eksplozije. Eksperimentalna ispitivanja uspoređena su s numeričkim simulacijama jednakog scenarija. Simuliran je prostor ispunjen zrakom u koji je postavljen naboj oblika valjka. Rezultati numeričkih simulacija ovise o veličini konačnih elemenata pa je provedeno više simulacija različitim veličinama konačnih elemenata zraka. Na temelju tih analiza odabran je model koji najbolje opisuje eksperimentalne rezultate, a ima realno vrijeme proračuna.

U drugoj fazi eksperimenta ispitane su tri metode ojačanja kako bi se dobio uvid u učinkovitost pri povećanju otpornosti stupova na djelovanje eksplozije. Na temelju rezultata i vizualnih pregleda provedena je kategorizacija oštećenja. Ploče izložene djelovanju eksploziva postavljene su izravno na gornju plohu ploče oštećene su u obliku proboja. Zadržane količine krhotina poslužile su za procjenu

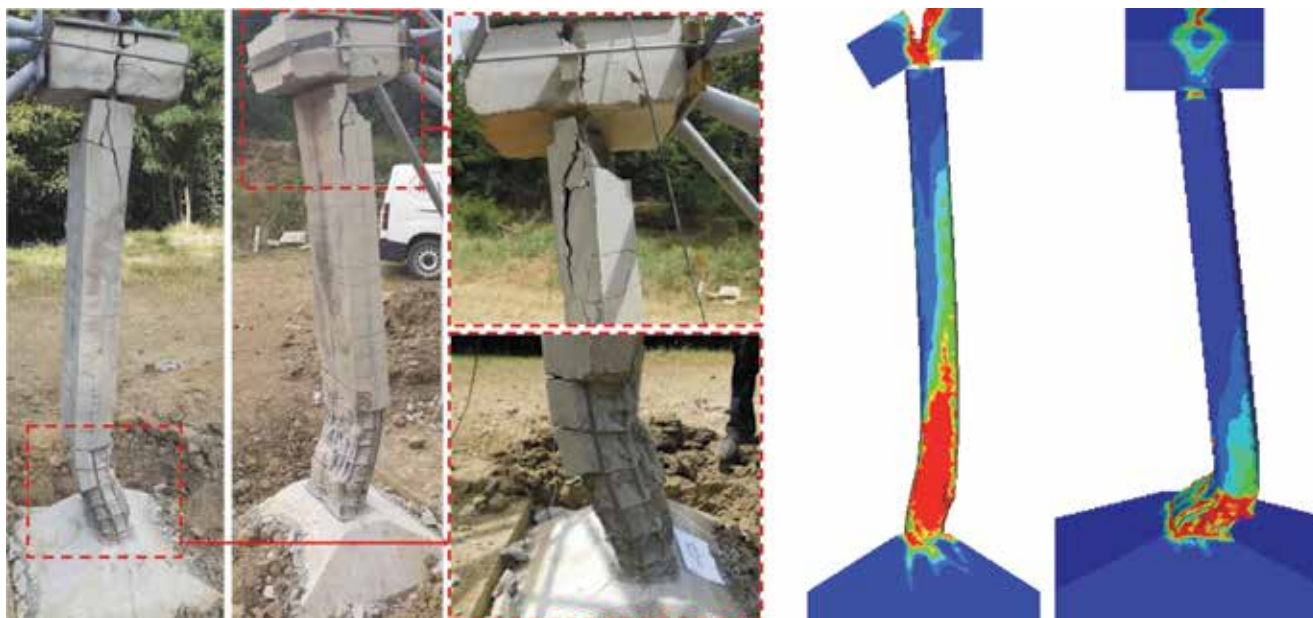
uspješnosti ojačanja na temelju količine zadržanoga materijala. Veća količina zadržanoga materijala indicira bolje ojačanje ploče smanjenom količinom letećih krhotina koje predstavljaju sekundarnu opasnost pri eksploziji, ali češće i opasniju od samog udara vala eksplozije.

Ploče ispitane na djelovanje eksplozije na vojnome poligonu transportirane su u laboratorij Građevinskoga i arhitektonskoga fakulteta u Osijeku. U laboratoriju je provedeno statičko ispitivanje ploča tako da je svaka ploča bila opterećena u dvije točke (engl. *four-point bending test*) kako bi se odredila preostala nosivost ploča.

U trećoj fazi eksperimentalnog istraživanja, koja je još uvijek u provedbi, dosad je provedeno ispitivanje na dvije serije uzoraka. U prvoj su seriji ispitani neojačani stupovi, a u drugoj oni ojačani izloženi djelovanju najveće količine eksploziva. Na temelju do sada provedenih ekspe-



Ploča ispitana na proboj (lijevo) i statičko ispitivanje ploče (desno)



Usporedba oštećenja stupova između eksperimentalnih (lijevo) i numeričkih rezultata (desno)

rimentalnih istraživanja u toj fazi može se zaključiti da mjesto postavljanja eksploziva ima važnu ulogu u intenzitetu oštećenja stupa. Kada je eksploziv postavljen kontaktno, oštećenje koje se javlja je veće, ali je lokalnoga karaktera, dok eksploziv postavljen na neku udaljenosti od stupa, osim lokalnog, oštećenja (posmika, ljuštenja, otpadanja betona), globalno oštećuje stup (savojne pukotine, zakrivljenost stupa). Također, ojačanje stupa ima važnu ulogu u smanjenju razine oštećenja.

Nakon ispitivanja postojećega stupa na djelovanje eksplozije i analize utjecaja ojačanja na ponašanje stupa pristupilo se seizmičkome projektiranju stupa nadvožnjaka. Seizmički projektirani stupovi također će biti ispitani na djelovanje eksplozije u jednakome scenariju kao i prethodni stupovi kako bi se vidio utjecaj seizmičkoga projektiranja i detaljiranja na otpornost stupova na djelovanje eksplozije. Predviđa se kako seizmički projektirani stupovi imaju dovoljnu razinu otpornosti na pretpostavljene količine

eksploziva te da se seizmičkim detaljiranjem stupa može postići stup otporan na višestruki rizik (engl. multihazard), no to tek treba ispitati i analizirati. U sklopu provedbe projekta BLAST do sada je objavljeno 14 znanstvenih radova u časopisima i znanstvenim skupovima.

**Napomena:** Autori priloga izv. prof. dr. sc. Ivan Radić i izv. prof. dr. sc. Hrvoje Draganić su izvanredni profesori na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Sveučilišta Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku