

Primljen / Received: 1.8.2017.

Ispravljen / Corrected: 11.1.2018.

Prihvaćen / Accepted: 20.12.2018.

Dostupno online / Available online: 10.8.2020.

## Ocjena seizmičke oštetljivosti postojeće strateški značajne AB zgrade pomoću nelinearno statičkih i dinamičkih analiza

### Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Youcef Mehani**, dipl.ing.građ.  
Državni istraživački centar za potresno građevinarstvo, Alžir  
[mehani\\_youcef@yahoo.com](mailto:mehani_youcef@yahoo.com)  
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Abderrahmane Kibboua**, dipl.ing.građ.  
Državni istraživački centar za potresno građevinarstvo, Alžir  
[akibboua@cgs-dz.org](mailto:akibboua@cgs-dz.org)



Izv.prof.dr.sc. **Benazouz Chikh**, dipl.ing.građ.  
Državni istraživački centar za potresno građevinarstvo, Alžir  
[Cheikhpsd@gmail.com](mailto:Cheikhpsd@gmail.com)



Izv.prof.dr.sc. **Mustapha Remki**, dipl.ing.građ.  
Državni istraživački centar za potresno građevinarstvo, Alžir  
[mremki@cgs-dz.org](mailto:mremki@cgs-dz.org)

Stručni rad

**Youcef Mehani, Abderrahmane Kibboua, Benazouz Chikh, Mustapha Remki**

### Ocjena seizmičke oštetljivosti postojeće strateški značajne AB zgrade pomoću nelinearno statičkih i dinamičkih analiza

Alžir je država s najvišom razinom seizmičke aktivnosti u sjevernoj Africi, a do sada je pretrpio više katastrofalnih potresa. Potres magnitude 6,8 koji je 2003. godine pogodio Boumerdes smatra se najrazornijim potresom koji je do sada pogodio područje u blizini glavnog grada Alžira. U njemu je poginulo ili ozlijeđeno više tisuća osoba. U potresu su mnoge strateški značajne AB zgrade pretrpjele velika oštećenja što je onemogućilo njihovu uporabljivost. U radu se ocjenjuje seizmička oštetljivost stare strateški značajne AB zgrade projektirane bez prethodne analize seizmičkog opterećenja.

#### Ključne riječi:

seizmička oštetljivost, AB zgrada, nelinearna dinamička i statička analiza, međukatni pomaci

Professional paper

**Youcef Mehani, Abderrahmane Kibboua, Benazouz Chikh, Mustapha Remki**

### Seismic vulnerability of an existing strategic RC building using non linear static and dynamic analyses

Algeria is the most seismically active country in the northern part of Africa, and it has so far suffered a number of catastrophic earthquakes. The 2003 Boumerdes earthquake, magnitude 6.8, was the most devastating earthquake that occurred near the capital Algiers, killing and injuring thousands of people. Many existing strategic RC buildings were severely damaged and hence made unfit for use after the earthquake. Seismic vulnerability of an old RC concrete strategic building designed without consideration for any seismic loading is assessed in the paper.

#### Key words:

Seismic vulnerability, RC building, nonlinear dynamic and static analysis, storey drift displacements

Fachbericht

**Youcef Mehani, Abderrahmane Kibboua, Benazouz Chikh, Mustapha Remki**

### Abschätzung des seismischen Schadens an einem strategisch bedeutenden Stahlbetongebäude mithilfe nicht linearer statischer und dynamischer Analysen

Algier ist das Land mit der höchsten seismischen Aktivität in Nordafrika, und hat bisher mehrere katastrophale Erdbeben erlebt. Ein Erdbeben der Stärke 6,8, das 2003 Boumerdes heimgesucht hat, betrachtet man als das verheerendste Erdbeben, das sich bis dahin in der Nähe der Hauptstadt Algiers ereignet hat. Dabei wurden mehrere Tausend Menschen getötet oder verletzt. Nach diesem Erdbeben haben viele strategisch wichtige Stahlbetongebäude großen Schaden genommen, was ihre Nutzbarkeit unmöglich machte. In dieser Abhandlung wird der seismische Schaden an alten strategisch wichtigen Stahlbetongebäuden eingeschätzt, die ohne vorherige Analyse der seismischen Belastbarkeit geplant wurden.

#### Schlüsselwörter:

seismischer Schaden, Stahlbetongebäude, nicht lineare dynamische und statische Analyse, Verschiebung der Zwischengeschosse

## 1. Uvod

Potresi visoke magnitude često se smatraju najznačajnijim prirodnim rizikom. U takvim se potresima smrtno stradale i ozlijeđene osobe broje u tisućama, a broj osoba koje tada ostaju bez doma još je i veći. Potres magnitude 6,8 koji je zadesio Boumerdes u svibnju 2003. nanio je goleme štete građevinama u širem području Zemmourija, Boumerdesa i grada Alžira, a pritom je smrtno stradalo 2278 osoba, 6782 osobe su pretrpjele ozljede, a bez doma je u toj katastrofi ostalo 130.000 osoba jer je u potresu srušeno više tisuća građevina [1-5]. Gotovo sve stare zgrade, izgrađene prije stupanja na snagu novog alžirskog zakona o projektiranju seizmički otpornih građevina (RPA 99/izdanje iz 2003.), pretrpjele su različito teška oštećenja. Mnoge od tih zgrada nalaze se u gradu Alžiru i smatraju se građevinama od strateške važnosti. Takve zgrade trebaju biti otporne na vrlo jake potrese, što znači da na njima ne smije doći do oštećenja konstrukcijskih elemenata, a na nenosivim elementima dopuštaju se vrlo mala ili nikakva oštećenja. Predviđena razina seizmičke učinkovitosti takvih zgrada jest razina "trenutne useljivosti" (eng. *Immediate Occupancy* - IO), tj. one moraju ostati potpuno funkcionalne nakon jakog potresa. Nažalost, mnoge postojeće strateške građevine projektirane su samo na vertikalna opterećenja. U ovom se radu analizira seizmička oštetljivost postojeće strateški značajne armiranobetonske građevine i to na temelju nelinearnih statičkih i dinamičkih proračuna. Usporedba nelinearnog dinamičkog odziva i nelinearnog statičkog proračuna strateške građevine provedena je u ovom primjeru na bazi bočnih sila i međukatnih pomaka. Deterministički pristup za određivanje seizmičke učinkovitosti usvojen je i proveden pomoću nelinearne statičke analize koja je primijenjena u seizmičkom projektiranju i ocjenjivanju građevina kako bi se odredila razina popuštanja konstrukcije i mehanizmi sloma. Osim toga, nelinearna dinamička analiza je najprikladniji sveobuhvatan analitički postupak za ocjenjivanje nelinearnog odziva konstrukcija. Kapacitet i zahtjevi izračunani su na bazi nelinearnih parametara primjenom statičkih i dinamičkih analiza. Ponašanje građevine ispitano je pri stanju popuštanja i graničnog popuštanja na dvije razine projektiranih potresa. Rezultati pokazuju da je zgrada izuzetno oštetljiva te da bi se mogla srušiti čak i pri potresu umjerene jačine.

## 2. Analitički postupci za ocjenu seizmičke učinkovitosti

Za analizu seizmičke učinkovitosti bilo koje građevine potrebna je ocjena nekih dinamičkih karakteristika i predviđanje njenog odziva na moguće potresno gibanje koji bi se mogli dogoditi u budućnosti tijekom trajanja građevine. Deterministički pristup za određivanje potresnog ponašanja izveden je primjenom nelinearne statičke analize kojom se određuje bočna nosivost građevine, te maksimalna razina oštećenosti građevine pri graničnom opterećenju, a u vidu krivulje sposobnosti nosivosti [7-11].

### 2.1. Nelinearna statička analiza

Nelinearne statičke analize često se koriste u potresnom proračunu i ocjenjivanju konstrukcija kao pokazatelji popuštanja konstrukcije i mogućih mehanizama sloma. Takvim su analizama izravno obuhvaćene nelinearne karakteristike sila-deformacija pojedinih komponenata zbog neelastičnog odziva materijala. Prednost takvih postupaka u odnosu na linearne postupke jest u tome što se izravno uzimaju u obzir utjecaji nelinearnog odziva materijala te su stoga izračunane unutarnje sile i deformacije realnije i bliže vrijednostima koje se mogu očekivati tijekom stvarnog potresa. Koristi se nekoliko metoda: ATC 40, FEMA 273, FEMA 440 i EC8 [12-14]. Prema tim metodama, nelinearne karakteristike sila-deformacija mogu se prikazati pomoću *pushover* krivulje u kojoj se otpornost građevine iskazuje kao odnos između posmične sile kata i pomaka na vrhu.

### 2.2. Statički proračun pomoću metode naguravanja

Nelinearna statička analiza provedena je pomoću metode naguravanja primjenom računalnog programa SAP 2000. Analiza je provedena u dva okomita smjera, a kao rezultat su dobivene vrijednosti odziva konstrukcije. Te su vrijednosti izražene kao ukupna poprečna sila na dnu građevine i maksimalni horizontalni pomak na vrhu.

Statički proračun prema metodi naguravanja provodi se tako da se model građevine podvrgne konstantnom gravitacijskom opterećenju te monotonom povećavanju bočnih sila po visini konstrukcije i to od nule od granične razine u skladu s prvim oblikom vibracije, sve do rušenja građevine [15-17]. Sustav jednadžbi koje se trebaju riješiti iskazuje se kako slijedi:

$$[K_p] \{\Delta U\} = \{\Delta F\} \quad (1)$$

gdje je:

$[K_p]$  - matrica krutosti,

$\{\Delta U\}$  - vektor postupnog pomaka,

$\{\Delta F\}$  - vektor postupnog nanošenja sile.

Proračun pomoću metode naguravanja vrlo je koristan za ocjenjivanje sljedećih karakteristika, a to su:

- sposobnost nosivosti konstrukcije pri poprečnoj sili u podnožju i pomaku na krovu radi mjerenja globalnih oštećenja
- maksimalna rotacija i duktilnost kritičnih konstrukcijskih elemenata radi mjerenja lokalnih oštećenja
- raspored plastičnih zglobova pri graničnom stanju radi određivanja mehanizma te pojave
- raspored oštećenja na konstrukciji, izraženo kroz indekse lokalnih oštećenja pri graničnom stanju.

Kako se u ovom radu uspoređuju nelinearno dinamički i nelinearno statički rezultati za međukatni pomak, u dva zadana postupka koristit će se samo ti parametri.

### 2.3. Izrada krivulje sposobnosti nosivosti

Krivulja sposobnosti nosivosti (slika 1.) obično se određuje kako bi se prikazao prvi oblik odziva konstrukcije na osnovi pretpostavke da do odziva konstrukcije na potresnu pobudu dolazi prije svega u osnovnom obliku vibriranja konstrukcije. Raspodjela horizontalnih sila po visini građevine trebala bi biti u skladu s prvim oblikom vibracije. Ako pretpostavimo da su međukatne konstrukcije krute dijafragme, bočne sile po katovima proporcionalne su umnošku mase i osnovnog oblika vibracije [18]:

$$F_i = \frac{m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i} V_b \quad (2)$$

gdje je:

$F_i$  - sila koncentrirana na i-tom katu

$m_i$  - masa koncentrirana na i-tom katu

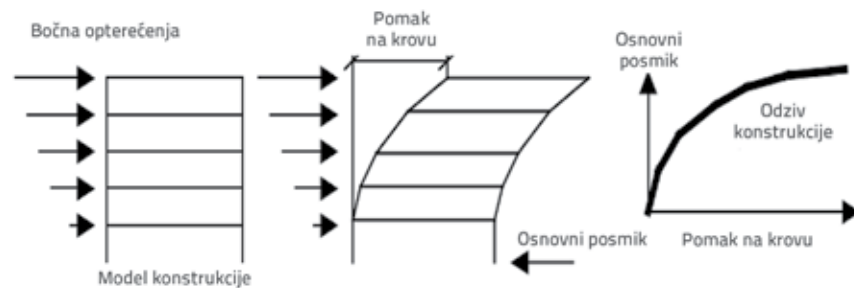
$\varphi_i$  - pomak za prvi oblik vibracije na i-tom katu

$V_b$  - osnovna poprečna sila koja odgovara zbroju poprečnih sila po katu

Sposobnost nosivosti svakog kata ocjenjuje se na temelju krivulje sposobnosti nosivosti građevine primjenom raspodjele svojstvenih vektora osnovnog oblika za apsolutne pomake.

Osnovni rezultati krivulje sposobnosti nosivosti mogu se sažeti na sljedeći način. U uzdužnom smjeru, prvi pomak pri popuštanju iznosi  $\delta_v = 0,013$  m, a odgovarajuća poprečna sila popuštanja iznosi  $V_v = 1103,953$  m.

Maksimalni vršni pomak iznosi  $\delta_u = 0,227$  m, a odgovarajuća maksimalna poprečna sila iznosi  $V_u = 5488,754$  kN. U poprečnom smjeru, pomak pri prvom popuštanju iznosi  $\delta_v = 0,028$  m, a odgovarajuća poprečna sila popuštanja iznosi  $V_v = 1847,336$  kN. Maksimalni vršni pomak iznosi  $\delta_u = 0,462$  m, a odgovarajuća maksimalna poprečna sila iznosi  $V_u = 3370,884$  kN.



Slika 1. Krivulja sposobnosti nosivosti prema odnosu poprečne sile u podnožju i pomaka na krovu

### 2.4. Nelinearna dinamička analiza

Nelinearna dinamička analiza najprikladniji je i najopsežniji analitički postupak za ocjenjivanje nelinearnog odziva konstrukcija. Danas je to napredna metodologija za predviđanje odziva građevina na potresno gibanje tla. U nelinearnoj

dinamičkoj analizi razmatraju se nelinearna svojstva građevine kao dio analize u vremenskom području. Ulazni potresni podaci se uzimaju u obzir proračunom u vremenu, što uključuje korak po korak ocjenu odziva građevine u vremenskoj domeni. To je najstroži analitički postupak za predviđanje sila i pomaka tijekom potresa. Međutim, izračunani odziv može biti vrlo osjetljiv na karakteristike zapisa gibanja tla. Stoga se treba provesti nekoliko vremenskih izračuna primjenom različitih zapisa gibanja tla, i to pri različitim razinama intenziteta kako bi se simuliralo nekoliko scenarija potresa. Vremenski zapis opterećenja podijeljen je na nekoliko manjih jednakih vremenskih intervala. Tijekom svakog od tih intervala smatra se da je ponašanje konstrukcije linearno elastično. Kod nelinearnog se ponašanja krutost mijenja u idućem intervalu opterećenja. Zato se odziv nelinearnog sustava predviđa pomoću odziva sekventnih serija linearnih sustava s različitim vrijednostima krutosti [19-21]. Nelinearna dinamička analiza provedena je prema metodologiji razvijenoj na institutu IZIS u Skoplju [22, 23]. Kako bi se definirao dinamički odziv konstrukcije, treba se riješiti dinamička jednadžba gibanja sustava, te se trebaju izračunati parametri sustava (pomak, brzina i akceleracija) pod djelovanjem potresa. Rješenje se iskazuje u inkrementalnom obliku pomoću izraza (3):

$$[M]\{\Delta\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K_r]\{\Delta U\} = \{\Delta F_{eff}\} \quad (3)$$

gdje je:

$[M]$  - matrica mase konstrukcije

$[C]$  - matrica prigušenja

$[K_r]$  - matrica tangentne krutosti

$\{\Delta F_{eff}\}$  - vektor inkrementalnih efektivnih dinamičkih sila

$\{\Delta U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$  - inkrementalne vrijednosti pomaka konstrukcije, brzine i akceleracije.

Za konstrukcijske je elemente korišten bilinearni histerezni model.

#### 2.4.1. Odabir potresnog gibanja tla

Kada se provode nelinearne dinamičke analize, važno je pozornost usmjeriti na odabir zapisa gibanja tla ovisno o potresnoj opasnosti dotične regije na geotehničke odrednice, na uvjete tla i na usklađenost s projektiranim spektrom za dotičnu regiju. Treba se osigurati i odgovarajući raspon akceleroograma kako se ne bi podcijenile moguće varijacije odziva konstrukcije [24, 25]. Analiza

potresne opasnosti regije provedena je na osnovi Glavne studije potresne opasnosti za državu Alžir [26]. U okviru pripreme te studije korišteni su podaci o seizmičkom zoniranju te propisi o seizmičnosti i prigušenju, kako bi se definirala maksimalna očekivana razina akceleracije u osnovnoj stijeni za stogodišnje i petstogodišnje povratno razdoblje [27]. U tablici 1. i na slici 2.

Tablica 1. Karakteristike zabilježenih pomaka tla

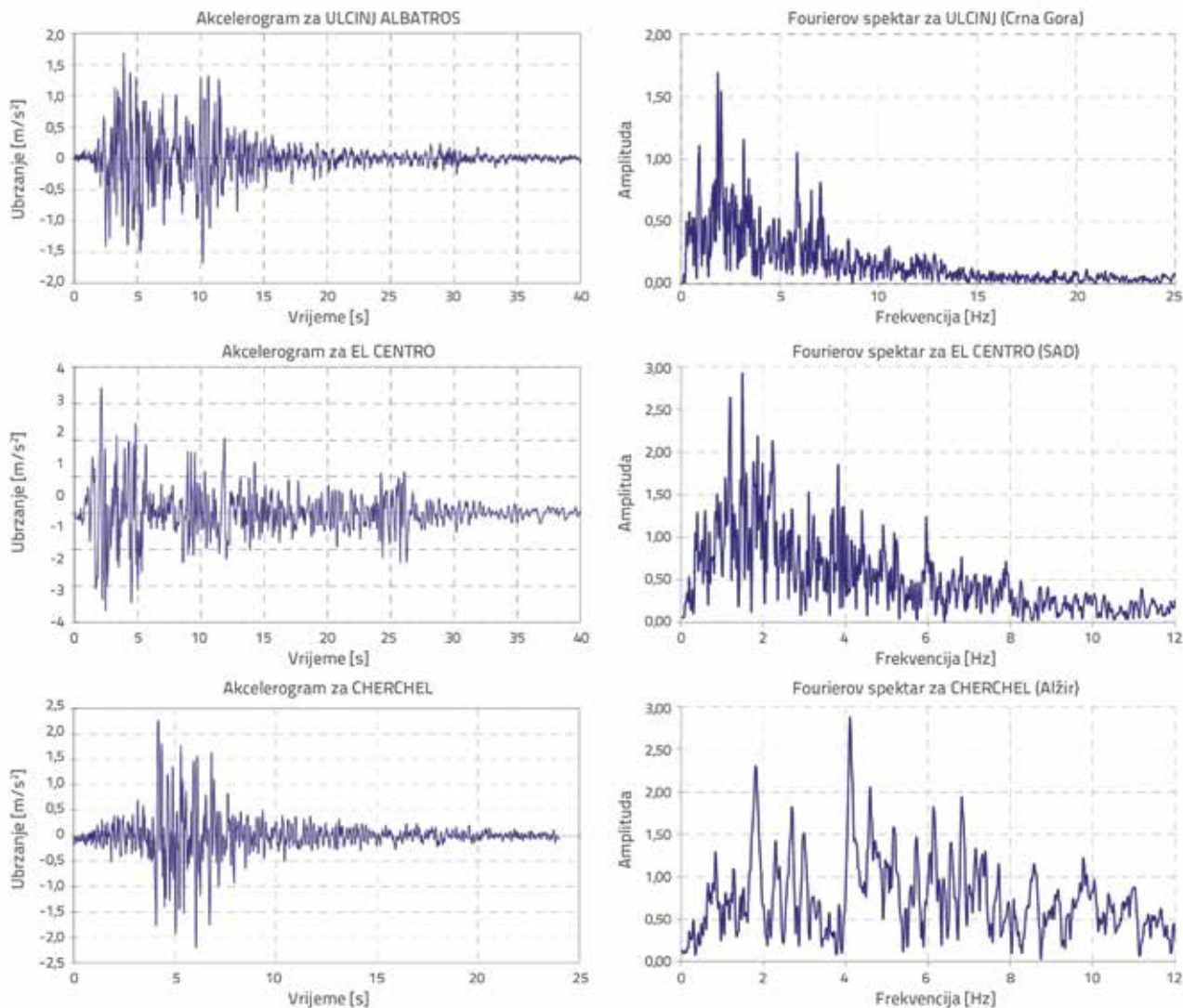
Potres	Država	Smjer	Godina	Trajanje [s]	$A_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]
Ulcinj, Albatros	Crna Gora	S - J	1979.	40	1,68
El Centro	USA	S - J	1940.	40	3,42
Cherchell	Algeria	S - J	1989.	24	2,26

prikazane su karakteristike akceleroograma koji se koriste u ovom proračunu, a temelje se na geotektonskoj strukturi i dostupnim podacima o velikim pomacima.

### 2.5. Granična stanja

Na temelju podataka o prijašnjim potresima i brojnim istraživanjima ustanovljeno je da postoji veza između utjecaja međukatnog pomaka konstrukcije i razine konstrukcijskih oštećenja. Stoga se u ovom radu naglasak stavlja na

međukatni pomak koji se smatra ključnim parametrom tijekom procjenjivanja oštećljivosti. U ovom se radu obrađuju dva granična stanja. Prvo granično stanje odnosi se na trenutačnu useljivost (IO). To se granično stanje oštećljivosti postiže kada se dopušteni pomak pri prvom popuštanju postigne u bilo kojem elementu zgrade. Građevina bi u tom slučaju pretrpjela minimalna oštećenja, a korisnici bi zgradu mogli bez problema koristiti nakon potresa. U tom se stanju zadržava ona ista čvrstoća i krutost građevine koja je postojala prije potresnog udara. Drugo granično stanje odnosi se na sigurnost za život



Slika 2. Odabrani akceleroگرامи i njihovi Fourierovi spektri

(LS). Granično stanje oštećljivosti postiže se kada se postigne dopušteni pomak pri prvom graničnom popuštanju, kako je definirano u izrazu (4). U tom stanju, život korisnika zgrade nije u opasnosti te se može s velikom razinom sigurnosti očekivati da neće doći do djelomičnog ili potpunog popuštanja konstrukcije [28-32].

$$\Delta = \min \left\{ \Delta_{capU}; \frac{H}{125 \div 150}; 1\%H \right\} \quad (4)$$

### 3. Analiza konkretnog slučaja

Za postizanje prije spomenutih ciljeva odabrana je postojeća strateški značajna AB sedmerokatnica smještena u glavnom gradu Alžiru. Zgradu koristi Ministarstvo za telekomunikacije, a smatra se dijelom državne telekomunikacijske infrastrukture koja treba funkcionirati tijekom i nakon snažnih potresa. Izgrađena je u sedamdesetim godinama prošlog stoljeća prema tada primjenjivim francuskim propisima (PS 69) [21]. Studija je upozorila na brojne nedostatke ove građevine.

#### 3.1. Prikupljanje podataka i preliminarna istraživanja

Postojanje određenih arhitektonskih nacrti može se smatrati dobrim polazištem za određivanje razmještaja stupova i visine katova te za aproksimaciju opterećenja na koja je građevina projektirana. Izvorni datumi projekata upućuju na propise koji su vjerojatno primjenjivani u projektiranju analizirane zgrade. Nažalost, kako nisu pronađeni nikakvi arhitektonski ni konstrukcijski nacrti, provođenje analize nije bio jednostavan zadatak. Pregledom građevine i izradom odgovarajućih nacrti utvrđeno je da su u građevini obavljene određene izmjene, da je ona zahvaćena korozijom koja je uočljiva prostim okom te da zgrada nije prikladno održavana.

Ova sedmerokatnica izgrađena je 1970. godine. Konstrukcijski se sustav sastoji od armiranobetonskih nosivih okvira s obodnim zidovima od šuplje opeke. Ukupna visina zgrade iznosi 37,31 m. Tlocrtna dužina građevine je 30 m, a tlocrtna širina 24 m. Katni sustav sastoji se od greda i šupljih betonskih blokova debljine 20 cm, koje nose armiranobetonske grede u oba smjera.

Kako je građevina izdržala nekoliko potresa srednje jačine, može se pretpostaviti da su obodni zidovi odvojeni od konstrukcije te da nisu povezani s okvirnim elementima. Drugim riječima, oni samo djeluju kao dodatna masa koja opterećuje konstrukciju i ne utječu bitno na cjelokupnu bočnu krutost građevine. Na temelju geoloških, geotehničkih i geofizičkih podataka, može se zaključiti da je građevina temeljena na tlu srednje kvalitete. Veza između tla i konstrukcije nije uzeta u obzir u dinamičkom proračunu. Zgrada analizirana u ovom radu prikazana je na slici 3. Osnovna svojstva analizirane zgrade iskazana su u tablici 2.



Slika 3. Opći pogled na zgradu

Tablica 2. Osnovna svojstva analizirane zgrade

Svojstva	Opis
Ukupna visina [m]	37,31
Broj katova	7
Visina kata [m]	Prvi kat: 4,91
	Drugi do sedmi kat: 5,40
Katna konstrukcija	Šuplja betonska međukatna konstrukcija debljine 20 cm
AB grede [cm x cm]	30 x 60 cm u uzdužnom smjeru
	40 x 120 cm u poprečnom smjeru
AB stupovi [cm x cm]	Katovi 1 do 3: 80 x 80
	Katovi 4 do 6: 70 x 70
	Sedmi kat: 45 x 45
Modul elastičnosti betona [MPa]	29859

#### 3.2. Prikupljanje podataka i preliminarna istraživanja

Podaci potrebni za ocjenu otpornosti postojeće građevine dobiveni su na temelju terenskih istraživanja koja su se sastojala od brojnih *in-situ* i laboratorijskih ispitivanja i postupaka (ultrazvučna ispitivanja). Odabrane su sljedeće karakteristike materijala:



**Beton:**

- tlačna čvrstoća:  $f_c = 20 \text{ MPa}$
- vlačna čvrstoća:  $\sigma_t = 1,8 \text{ MPa}$
- deformacija pri maksimalnoj tlačnoj čvrstoći:  $\varepsilon_y = 0,002$
- granična tlačna deformacija:  $\varepsilon_u = 0,0035$

**Armatura:**

- granica popuštanja uzdužne armature:  $f_{yt} = 400 \text{ MPa}$
- granica popuštanja poprečne armature:  $f_{vt} = 235 \text{ MPa}$
- deformacija pri popuštanju uzdužne armature:  $\varepsilon_{vt} = 0,002$
- deformacija pri popuštanju poprečne armature:  $\varepsilon_{yt} = 0,0018$
- granična deformacija posmične armature:  $\varepsilon_{ul} = 0,010$

### 3.3. Namjena građevine i definiranje propisa za projektiranje

Građevina se sada koristi za telekomunikacijske potrebe, pa budući da se radi o strateški važnoj građevini, mora udovoljiti kriterijima koji su definirani u sadašnjim alžirskim seizmičkim propisima (RPA99/izdanje 2003.).

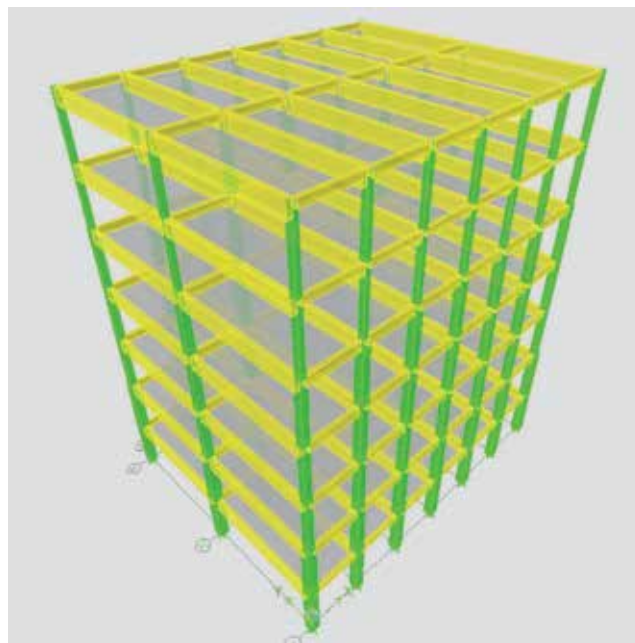
### 3.4. Opis modela i analitičke metode

Značajan napredak u računarskoj tehnologiji i mogućnost izvođenja vrlo složenih proračuna omogućuje danas vrlo detaljno modeliranje armiranobetonskih konstrukcija pomoću metode konačnih elemenata. Prema potresnim zahtjevima koji su propisani u dokumentu RPA99 / izdanje 2003., provedena je primarna linearna analiza kako bi se istražio globalan odziv čitave konstrukcije. Ova faza uključuje izračunavanje vertikalne raspodjele bočnih sila na osnovi ekvivalentne statičke metode, izračunavanje ekscentričnosti u slučaju dodatnog torzijskog momenta, raspodjelu posmičnih sila po okvirima, ocjenu katnog pomaka itd. Računalni program SAP 2000 [22] korišten je za: trodimenzionalno modeliranje konstrukcije, detaljno određivanje raspodjele mase i krutosti po građevini te za određivanje utjecaja tlocrtnih i vertikalnih nepravilnosti.

Analiza spektra odziva provedena je kako bi se ocijenio seizmički odziv te odredile ukupne projektirane sile koje djeluju na nosive

bočne elemente. Trodimenzionalni model konstrukcije ove zgrade prikazan je na slici 4.

Analiza linearne elastičnosti provedena je pomoću računalnog programa SAP 2000 [26]. Periodi konstrukcije u uzdužnom smjeru iznose  $T_x = 1,32 \text{ s}$ , a u poprečnom smjeru iznose  $T_y = 1,19 \text{ s}$ .



Slika 4. Prostorni model konstrukcije

### 4. Rezultati analize i indikatori seizmičkog rizika

Kako se radi o građevini od strateške važnosti, nisu dopuštena nikakva konstrukcijska niti nekonstrukcijska oštećenja, a potresna učinkovitost građevine treba udovoljavati kriterijima trenutne useljivosti (IO). Projektirana poprečna sila u podnožju zgrade raspodijeljena je po visini okvira zgrade, a pritom se postupalo u skladu s dokumentom RPA99 / izdanje 2003. godine kako bi se dobile sile na razini katova. Potresne sile

Tablica 3. Potresne i poprečne sile za oba osnovna smjera (XX i YY)

Kat	$F_{ix}$ [kN]	$V_{ixd}$ [kN]	$F_{iy}$ [kN]	$V_{iyd}$ [kN]
7	2736,13	2736,13	2494,94	2494,94
6	2084,66	4820,79	2566,89	5061,83
5	2094,66	6915,45	2199,39	7261,22
4	1648,73	8564,18	1731,16	8992,38
3	1350,07	9914,25	1417,58	10409,96
2	1039,76	10954,01	1091,75	11501,71
1	400,72	11354,73	420,76	11922,47

gdje su:

$F_{ix}$  i  $F_{iy}$  - potresne sile na razini "i" za uzdužne i poprečne smjerove

$V_{ixd}$  i  $V_{iyd}$  - vrijednosti zahtijevanih poprečnih sila na razini "i" za uzdužne i poprečne smjerove

Tablica 4. Koeficijenti sigurnosti za oba osnovna smjera (XX i YY)

Kat	$V_{ixc}$ [kN]	$V_{ixd}$ [kN]	$S_{ix} (V_{ixc}/V_{ixd})$	$V_{iyc}$ [kN]	$V_{iyd}$ [kN]	$S_{iy} (V_{iyc}/V_{iyd})$
7	1014,29	2736,13	0,381	986,62	2494,94	0,395
6	1871,60	4820,79	0,388	2074,20	5061,83	0,409
5	2172,14	6915,45	0,314	2440,57	7261,22	0,336
4	3127,87	8564,18	0,365	3452,11	8992,38	0,383
3	3136,80	9914,25	0,316	3408,73	10409,96	0,327
2	4363,25	10954,01	0,398	4606,64	11501,71	0,400
1	5487,46	11354,73	0,483	5409,30	11922,47	0,453

gdje su:

$V_{ixc}$  i  $V_{iyc}$  - vrijednosti otpornosti na poprečne sile na razini "i" za uzdužne i poprečne smjerove

$V_{ixd}$  i  $V_{iyd}$  - vrijednosti zahtjevanih poprečnih sila na razini "i" za uzdužne i poprečne smjerove

$S_{ix}$  i  $S_{iy}$  - koeficijenti sigurnosti za uzdužne i poprečne smjerove

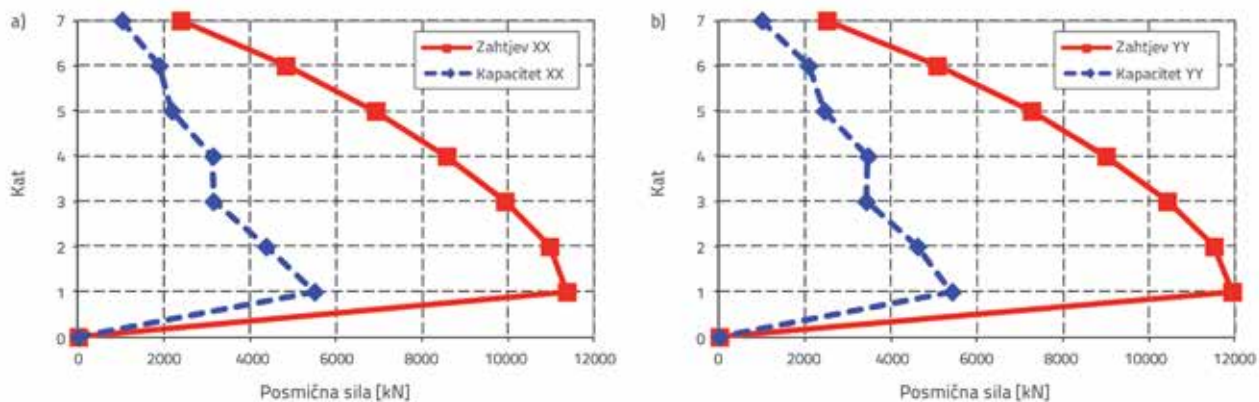
i poprečne sile na pojedinim katovima, te sigurnosni koeficijenti, prikazani su za svaki osnovni smjer u tablicama 3. i 4. Prema našoj metodologiji, da bi se zgrada smatrala sigurnom, odnos između otpornosti na poprečnu silu i zahtjevane poprečne sile treba biti veći od 1,15 [34].

#### 4.1. Nelinearno modeliranje zgrade

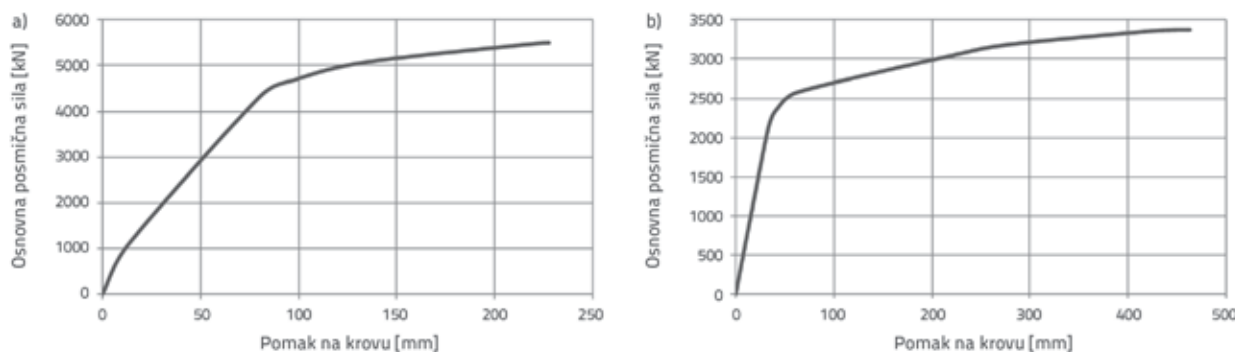
Za proračun nelinearnog dinamičkog odziva građevine korišten je računalni program DRABS (eng. *Dynamic Response Analysis of Building Structure*, tj. analiza dinamičkog odziva konstrukcije

građevine) te odabrani zapisi o pomacima tla. Matematički model korišten za proračun u elastičnom području proširen je tako da obuhvaća i čvrstoću konstrukcijskih elemenata i njihovo poslijeelastično ponašanje [35, 36]. Usvojeni su odnosi naprežanja i deformacija za beton i armaturu prema preporukama iz dokumenta CBA 93 [37] kako bi se tijekom nelinearnog proračuna što realnije prikazalo stvarno ponašanje građevine.

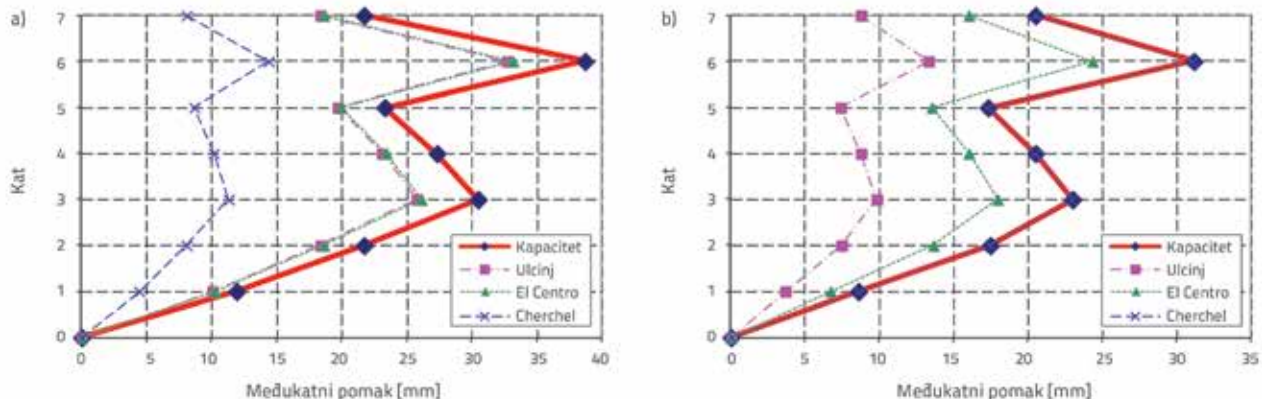
Za određivanje nosivosti (krivulje nosivosti) konstrukcije na temelju čvrstoće i deformabilnosti korišten je računalni program za okvirne/zidane sustave UARCS (eng. *Ultimate Analysis of*



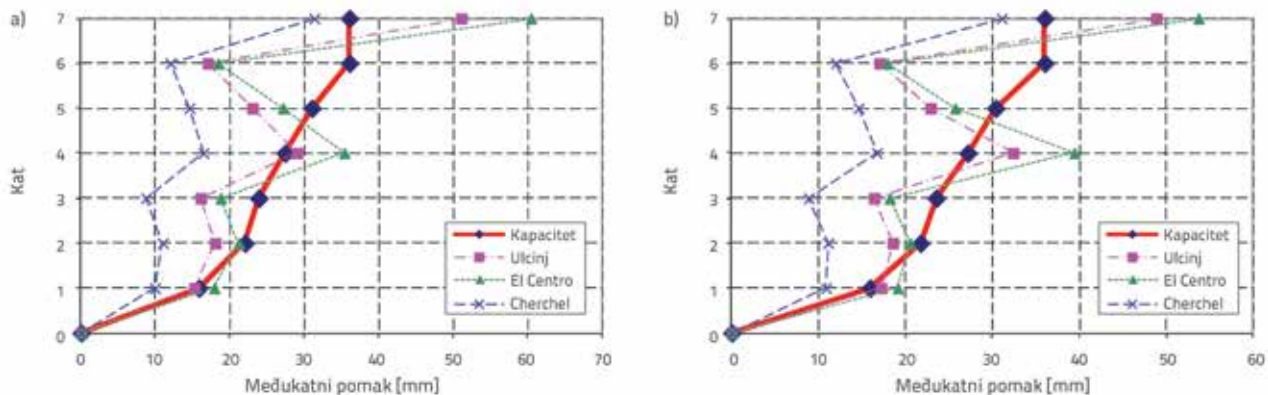
Slika 5. Usporedba kapaciteta i zahtjeva za poprečne sile: a) uzdužni smjer; b) poprečni smjer



Slika 6. Krivulje kapaciteta: a) uzdužni smjer; b) poprečni smjer



Slika 7. Međukatni pomak definiran linearnom statičkom analizom za oba osnovna smjera: a) uzdužni smjer; b) poprečni smjer



Slika 6. Krivulje kapaciteta: a) uzdužni smjer; b) poprečni smjer

Rectangular Cross Section). Kao ulazni podaci korišteni su, između ostalog, i sljedeći parametri: vertikalna opterećenja, geometrijske karakteristike poprečnih presjeka, raspored armature i armaturnih vilica te karakteristike materijala.

Prema rezultatima iz tablice 4., faktori sigurnosti  $S_{ix}$  i  $S_{iy}$  na svakoj su razini veći od 1,15 te se stoga građevina smatra stabilnom i otpornom na potresne sile.

Slika 5. prikazuje zahtjev izračunan prema alžirskom propisu RPA 99/izdanje 2003., te kapacitet u odnosu na poprečne sile u uzdužnom (XX) i poprečnom (YY) smjeru.

Pushover krivulje za nelinearno statičko ponašanje konstrukcije u uzdužnom (XX) i poprečnom (YY) smjeru, koje prikazuju promjenu vrijednosti pomaka u podnožju zgrade u ovisnosti o pomaku krova, prikazane su na slici 6.

Slika 7. prikazuje rezultate nelinearne statičke analize (pushover proračun) u uzdužnom i poprečnom smjeru za kapacitete i zahtjeve u pogledu međukatnog pomaka.

Za nelinearni dinamički proračun, nosivost konstrukcije određuje se primjenom računalnog programa za granični proračun pravokutnih armiranobetonskih poprečnih presjeka sustava okvira i zidova (UARCS) te primjenom računalnog programa DRABS [22, 23] za svaki konstrukcijski element i za svaku razinu građevine. Slika 8. prikazuje rezultate nosivosti i zahtijevane rezultate za međukatni pomak u uzdužnom i poprečnom smjeru,

u slučaju jakog potresa ( $A_{max} = 0,40$  g, prema propisu RPA99/ izdanje 2003. za građevine od velikog značenja).

### 5. Rezultati proračuna

Nakon proračuna, dobiveni su sljedeći rezultati:

- Što se tiče djelovanja poprečnih sila na pojedinom katu konstrukcija se smatra u potpunosti nesigurnom u oba smjera. Vrijednosti faktora sigurnosti vrlo su niske te bitno niže od granične vrijednosti (1,15), vidi tablicu 2.
- Što se tiče rezultata nelinearnog statičkog proračuna (slika 7.), može se uočiti da su kapaciteti međukatnog pomaka veći od zahtijevanih.
- Međutim, rezultati nelinearnog dinamičkog proračuna pokazuju da građevina ne bi mogla podnijeti potres snažnijeg intenziteta. Otpornost na međukatni pomak niža je od zahtijevanog, kao što se može uočiti na slici 8. Deformacije zgrade veće su od granične čvrstoće, što može dovesti do ozbiljnih oštećenje te do potpunog rušenja zgrade u slučaju jakog potresa.

Preporučuje se provedba postupka nelinearnog dinamičkog proračuna tijekom seizmičkog ocjenjivanja sličnih postojećih građevina.



## 6. Zaključak

Ocjenjivanje seizmičkog ponašanja postojeće strateški značajne armiranobetonske građevine provedeno je u skladu sa sadašnjim alžirskim seizmičkim propisima (RPA99/izdanje 2003.). Provedeni su nelinearni statički i dinamički proračuni kako bi se izračunali zahtjevi i otpornost građevine na pojavu međukatnog pomaka.

Prema rezultatima proračuna i alžirskim seizmičkim propisima (RPA99/izdanje 2003.), analizirana građevina ne udovoljava ciljnim zahtjevima pouzdanosti te se treba pojačati.

Kako se građevina nalazi u zoni visoke seizmičnosti (zona III), ona se prema alžirskim seizmičkim propisima (RPA99/izdanje 2003.) treba pojačati uz pomoć dvojne konstrukcije (AB okviri i posmični zidovi), što je zahtjev za građevine čija ukupna visina prelazi osam metara. Smatra se da su armiranobetonski nosivi zidovi, izvedeni po čitavoj visini građevine kao najpogodniji sustav za seizmičku zaštitu kostur

konstrukcije. Kako bi se poboljšala potresna učinkovitost zgrade, trebaju se u svakom osnovnom smjeru izvesti dva AB posmična zida. Ti se zidovi trebaju postaviti simetrično u odnosu na centar mase te po mogućnosti blizu rubova zgrade kako bi se stabilizirao dinamički odziv te na minimum svela oštećenja dijafragmi. Na taj bi se način znatno smanjio apsolutni pomak na vrhu zgrade, pa bi građevina bila potpuno funkcionalna nakon jakog potresa. Drugim riječima, zahtjev je postići visoku razinu potresne učinkovitosti u slučaju jakog potresa, bez oštećenja nosivih elemenata, te s manjim oštećenjima nenosivih elemenata. Za takve strateški značajne građevine ciljna je razina seizmičke učinkovitosti "trenutačna useljivost" (IO).

## Zahvale

Izradu ovog rada podržao je Državni istraživački centar za potresno inženjerstvo (CGS).

## LITERATURA

- [1] Deverchere, J., Yelles, K., Domzig, A., Mercier de Lépinay, B., Bouillin, J. P., Gaullier, V., Le Roy, P.: Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake. *Geophysical research letters*, 32 (2005) 4, <https://doi.org/10.1029/2004GL021646>.
- [2] Laouami, N., Slimani, N., Bouhadad, Y., Chatelain, J.-L., Nour, A.: Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: Consequences on damage distribution and the Algerian Seismic Code. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26 (2006), pp. 991–1003.
- [3] Mehani, Y., Bechtoula, H., Kibboua, A., Naili, M.: Assessment of seismic fragility curves for existing RC buildings in Algiers after the 2003 Boumerdes earthquake. *Structural Engineering and Mechanics*, 46 (2013) 6, pp. 791–808, <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2013.46.6.791>.
- [4] Remki, M., Benouar, D.: Damage potential and vulnerability functions of strategic buildings in the city of Algiers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (2014) 6, pp. 1726–1734.
- [5] Kibboua, A., Farsi, M.N., Chatelain, J.L., Guillier, B., Bechtoula, H., Mehani, Y.: Modal analysis and ambient vibration measurements on Mila-Algeria cable stayed bridge. *Structural Engineering and Mechanics*, 29 (2008) 2, pp. 171–186.
- [6] C.G.S.: Seismic Code for Building Design and Construction, R.P.A 99/ Version 2003. National Earthquake Engineering Centre. Technical document. Algiers, Algeria, 2003.
- [7] Kibboua, A., Bechtoula, H., Mehani, Y., Naili, M.: Vulnerability assessment of reinforced concrete bridge structures in Algiers using scenario earthquakes. *Bulletin of earthquake engineering*, 12 (2014) 2, pp. 807–827.
- [8] Park, J., Towashiraporn, P., Craig, J.I., Goodno, B.J.: Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures. *Engineering Structures*, 31 (2009) 1, pp. 125–37.
- [9] Barbat, A.H., Pujades, L.G., Lantada, N.: Seismic Damage Evaluation in Urban Areas using the Capacity Spectrum Method: application to Barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28 (2008) 10–11, pp. 851–865.
- [10] Roshi, A., Saraçi, I.: The application of capacity design in a RC building frame structure. 2<sup>nd</sup> international Balkans conference on challenges of civil engineering, BCEE, 23–25 May, Epoka University, Tirana, Albania, 2013.
- [11] Kibboua, A., Naili, M., Benouar, D., Kehila, F.: Analytical fragility curves for typical Algerian reinforced concrete bridge piers. *Structural Engineering and Mechanics*, 39 (2011) 3, pp. 411–425.
- [12] Cancellara, D., De Angelis, F.: Steel Braces in Series with Hysteretic Dampers for Reducing the Seismic Vulnerability of RC Existing Buildings: Assessment and Retrofitting with a Nonlinear Model. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 204–208 (2012) October, pp. 2677–2689, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.2677>.
- [13] Zermout, S., Bakhti, F., Mehani, Y., Inukai, M., Azuhata, T., Saito, T.: Seismic Vulnerability of a Strategic Building Designed by Algerian Seismic Code RPA99, using the Capacity Spectrum Method. The 14<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering, October 12–17, Beijing, China, 2008.
- [14] Gueguen, P.: Seismic Vulnerability of Structures. Wiley-ISTE, ISBN: 978-1-84821-524-5, 368 pages. Hoboken, NJ, 2013.
- [15] Nour El-Din Abd-Alla, M.: Application of Recent Techniques of Pushover for Evaluating Seismic Performance of Multistorey Buildings. Master of Science Dissertation, Faculty of Engineering, University of Cairo, Egypt, 2007.
- [16] Behnam, B., Ronagh, H.: Performance-Based Vulnerability Assessment of Multi-Storey Reinforced Concrete Structures Exposed to Pre- and Post-Earthquake Fire. *Journal of Earthquake Engineering*, 18 (2014) 6, pp. 853–875, <http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2014.914454>.

- [17] Teran-Gilmor, A., Sanchez-Badillo, A., Espinosa-Johnson, M.: Performance-based seismic design of reinforced concrete ductile buildings subjected to large energy demands. *Earthquakes and Structures Journal*, 1 (2010) 1, pp. 69-91, <https://doi.org/10.12989/eas.2010.1.1.069>.
- [18] Kibboua, A., Kehila, F., Hemaidi-Zourgui, N., Remki, M.: Comparison between fragility curves of reinforced concrete bridge piers designed by old and recent Algerian codes. *Eurasian Journal of Engineering Sciences and Technology*, 1 (2017) 2, pp. 56-67.
- [19] De Angelis, F., Cancellara, D.: Seismic Vulnerability of Existing RC Buildings and Influence of the Decoupling of the Effective Masonry Panels from the Structural Frames. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 256-259 (2012), pp. 2244-2253, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.646>.
- [20] Cancellara, D., De Angelis, F., Modano, M., Pasquino, V.: Innovative Strategy to Reduce the Seismic Vulnerability of a RC Existing Building: Assessment and Retrofitting. *Key Engineering Materials*, Vols. 569-570 (2013), pp. 191-198, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.569-570.191>.
- [21] Règles de construction parasismique, Règles PS applicable aux bâtiments-PS 69, Editions Eyrolles, France.
- [22] Bozinovski, Z., Gavrilovic, P.: Computer program for ultimate analysis of rectangular reinforced concrete cross sections of frames and walls systems, UARCS, IZIS, University of Skopje, Republic of Macedonia, 1993.
- [23] Bozinovski, Z., Gavrilovic, P.: Computer program for dynamic response analysis of building structures, DRABS, IZIS, University of Skopje, Republic of Macedonia, 1993.
- [24] Sobaih, M.E., Nazif, M.A.: A proposed methodology for seismic risk evaluation of existing reinforced school buildings. *Housing and Building National Research Center, HBRC Journal*, 8 (2012) 3, pp. 204-211, <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2012.10.006>.
- [25] Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Kibboua, A., Mehani, Y.: The effects of building characteristics and site conditions on the damage distribution in Boumerdès after the 2003 Algeria earthquake. *Earthquake Spectra*, 28 (2012) 1, pp. 185-216.
- [26] Messaoudi, A., Laouami, N., Mezouar, N.: Slope topography-induced spatial variation correlation with observed building damages in Corso during the May 21, 2003, Mw 6.8, Boumerdes earthquake (Algeria). *Journal of Seismology*, pp. 1-19, 2017.
- [27] Mehani, Y., Kibboua, A.: Seismic assessment of a R/C existing strategic building. *Structural Engineering and Mechanics*, 26 (2007) 6, pp. 617-634.
- [28] Ghosh, J., Padgett, J.E.: Aging considerations in the development of time-dependant seismic fragility curves. *Journal of Structural Engineering*, 136 (2010) 12, pp.1497-511.
- [29] Inoue, A., Mehani, Y.: Seismic evaluation and retrofit plan of existing reinforced concrete building of Algiers in Algeria. The 14<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering, October 12-17, Beijing, China, 2008.
- [30] Ghobarah, A.: On drift limits Associated with Different Damage Levels. *Proceedings of the International Workshop B1'04*, 28 June -1 July, Bled, Slovenia, 2004.
- [31] Rodriguez, M.E., Padilla, D.: A damage Index for the Seismic Analysis of Reinforced Concrete Members. *Journal of Earthquake Engineering*, 13 (2009) 3, pp. 364-383.
- [32] Korkmaz, K.A., Kayhan, A.H., Ucar, T.: Seismic assessment of R/C residential buildings with infill walls in Turkey. *Computers and Concrete*, 12 (2013) 5, pp. 681-695, <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2013.12.5.681>.
- [33] Wilson, E., Habibullah, A.: Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, SAP 2000. *Computers and Structures, Inc*, Berkeley, California, 1997.
- [34] Mehani, Y., Benouar, D., Bechtoula, H., Kibboua, A.: Vulnerability evaluation of the strategic buildings in Algiers (Algeria): a methodology, *Natural Hazards*, 59 (2011) 6, pp. 529-551, <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9774-z>.
- [35] Pejovic, J., Janković, S.: Dependence of RC high-rise buildings response on the earthquake intensity, *Građevinar*, 67 (2015) 8, pp. 749-759, <https://doi.org/10.14256/JCE.1205.2014>
- [36] Apostolska, R., Necevska-Cvetanovska, G., Bojadjiev, J., Bojadjieva, J.: Seismic performance of RC high-rise buildings – a case study of 44 storey structure in Skopje (Macedonia), *Technical Gazette*, 23 (2016) 4, pp. 1177-1183.
- [37] C.G.S.: Design and calculation rules of the reinforced concrete structures, C.B.A 93. Technical document. D.T.R.-BC.2-41. Algiers, Algeria, 2003.