

Ispitivanje akustičkih osobina drveta i identifikacija modova skeniranjem uzorka u veoma bliskom polju

Filip Pantelić, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Daniel Ridley-Ellis

Apstrakt — Skeniranjem uzorka drveta, pobuđenog vibracijama mikrofonom u veoma bliskom polju, moguće je ostvariti dobru vizualizaciju njegovih modova oscilovanja. Eksperimentalna postavka, prikazana u ovom radu, korišćena je u svrhe karakterizacije osobina drveta i promatranja promena njegovih vibroakustičkih karakteristika usled kontrolisane promene vlažnosti uzorka. Veliki broj merenja pri ovakvim ispitivanjima zahteva brz i jednostavan postupak sa zadovoljavajućom ponovljivošću i preciznošću prikupljenih rezultata. U susret ovim zahtevima izvršena su merenja u veoma bliskom polju vibrirajućeg drvenog uzorka korišćenjem jednostavne instrumentacije.

Ključne reči— muzička akustika, modovi oscilovanja, veoma blisko polje, muzički instrumenti

I. UVOD

Od velikog značaja je mogućnost da se predvidi kako će se neki komad drveta ponašati kao deo muzičkog instrumenta. Prikazivanje modova oscilovanja jedan je od načina da saznamo nešto više o vibroakustičkim osobinama nekog posmatranog drvenog uzorka. U muzičkoj akustici za to postoje brojne metode a neke datiraju još iz osamnaestog veka [1]. Kladnijeve figure, dobijene na vibrirajućim površinama grupisanjem praha na mestima gde se nalaze čvorovi, predstavljaju metod koji i danas koriste graditelji prilikom procesa pravljenja jednog instrumenta.

Na modove oscilovanja primarno utiče geometrijska forma, pa se podešavanjem oblika može uticati na njegov odziv, ali takođe utiču i karakteristike materijala od koga je posmatrani element napravljen. Karakteristike nekog materijala koje su od interesa sa stanovišta muzičke akustike su Jangov moduo elastičnost i faktor gubitaka. Jangov moduo povezuje se sa krutošću drveta, dok faktor gubitaka govori o tome koliko dugo će drvo nakon pobude nastaviti da osciluje. Ovaj

parametar direktno je povezan sa onim što se u literaturi naziva *sustain*.

Drvo kao materijal, sa obzirom na njegovu hidroskopnost, veoma je osetljivo na promene atmosferskih uslova, stoga se muzički instrumenti moraju odlagati i čuvati u uslovima adekvatne vlažnosti vazduha. Izlaganje previše suvom vazduhu može dovesti do rasušivanja instrumenta, a na kraju i do pojave pukotina na drvetu. Promene vlažnosti drveta utiču prvenstveno na njegovu masu, ali takođe i na Jangov moduo elastičnosti i faktor gubitaka.

Standardna procedura za merenje Jangovog modula elastičnosti podrazumeva kao pobudu impulsnu eksitaciju na osnovu koje se, za test uzorak poznatih dimenzija, merenjem frekvencija rezonanci mogu proračunati traženi parameter [2]. Signal se beleži mikrofonom koji je postavljen u blizini uzorka. Proces opadanja zvučne energije nakon pobude impulsom frekvencijski je zavisao i na osnovu njega može se izračunati faktor gubitaka posmatranog uzorka.

Kod merenja impulsnog odziva, u slučaju drveta, potrebno je imati konstantnu i ponovljivu pobudu i uzorak eksitovati uvek u istoj tački, što u praksi nije lako izvodljivo. Pozicija mikrofona koji beleži odziv utiče na rezultate što takođe predstavlja problem pri merenju. Ovakva analiza, na kraju, ne omogućava nam vizualizaciju modova posmatranog uzorka, pa samim tim i ne daje informacije o eventualnoj prostornoj promeni posmatranih parametara.

Snimanje odziva uzorka u veoma bliskom polju jedan je od načina da se ostvari vizualizacija njegovih modova oscilovanja korišćenjem jednostavne instrumentacije. Sam proces skeniranja podrazumeva mikrofonsko snimanje zvučnih uzoraka od tačke do tačke neposredno iznad vibrirajuće površine. Veoma blisko polje podrazumeva da se mikروفon nalazi na udaljenosti d od svega par milimetara iznad analiziranog uzorka. Uzorak se eksituje vibracijama koje generiše šejker pobuđen signalom roze šuma. U slučaju kada je ispunjen uslov da je

$$d < 0,11a \quad (1)$$

gde je a širina antinoda, odnosno rastojanje između dva susedna čvora, možemo govoriti o veoma bliskom polju [3]. Zučni pritisak koji beleži mikروفon u ovim granicama ne varira više od 1 dB i srazmeran je sa brzinom oscilovanja posmatrane površine.

Problem kod snimanja u veoma bliskom polju, u poređenju sa impulsnom eksitacijom, je taj da proces traje relativno dugo [4], naročito ako se skenira u velikom broju tačaka. Ovo

Filip Pantelić – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija
(e-mail: filip_pantelic@gmail.com)

Dragana Šumarac Pavlović – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs)

Miomir Mijić – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs)

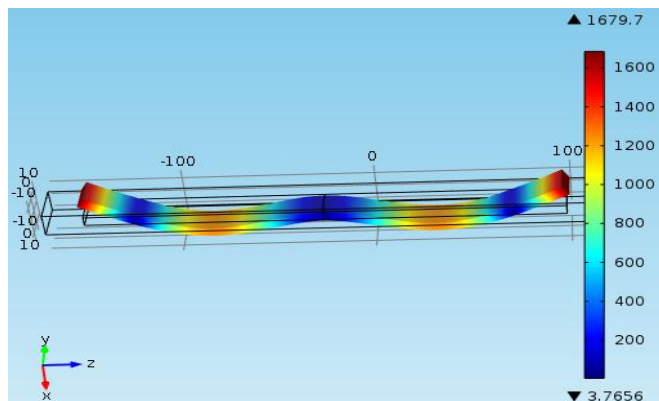
Daniel Ridley-Ellis, Edinburgh Napier University, Centre for Wood Science & Technology, Institute for Sustainable Construction, Edinburgh, UK (d.ridley-ellis@napier.ac.uk)

može predstavljati problem ako je potrebno zabeležiti neke brze promene u karakteristikama materijala ili ako je potrebno zabeležiti karakteristiku materijala pre nego što se ona promeni. U slučaju drveta potrebno je iz tog razloga imati nepromenljive atmosferske uslove kako se u procesu skeniranja parametri ne bi izmenili.

II. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja bio je da se ispituju uticaji različitih tretmana kojima može da se podvrgne drvo na promenu njegovih performansi. Različitim hemijskim postupcima i industrijskim sušenjem drvetu se menjaju vibroakustičke osobine. Procesi ubrzanog sušenja primenjuju se u današnjoj industriji muzičkih instrumenata u cilju skraćivanja perioda potrebnog da se od sveže posečenog stabla dobije komad drveta koji je spreman da se od njega pravi instrument. Način i brzina sušenja drveta utiču na njegove karakteristike i njegovu krutost, što ukazuje na činjenicu da vreme kao parametar igra značajnu ulogu u ovom procesu [5].

Na tržištu muzičkih instrumenata stare majstorske violine su najcenjenije. Pored izbora drveta, načina sušenja ili vrste laka koji su stari graditelji instrumenata koristili, po mišljenju mnogih muzičara, konzervatora i graditelja instrumenata, ukupnom kvalitetu instrumenta doprinosi dugogodišnja izloženost vibracijama izazvanih sviranjem



Sl.1 FEM model drvenog uzorka pobuđenog vibracijama na 1917 Hz

U okviru Cost projekta pod nazivom Wood MusICK vršena su istraživanja čiji je predmet bio ispitivanje uticaja različitih tretmana na vibroakustičke karakteristike drveta. Ispitivan je uticaj različitih procesa sušenja kao i uticaj dugotrajnih vibracija kojima je pobuđivan uzorak. Snimanje modova vibracija u veoma bliskom polju bio je jedan od segmenata ovog istraživanja.

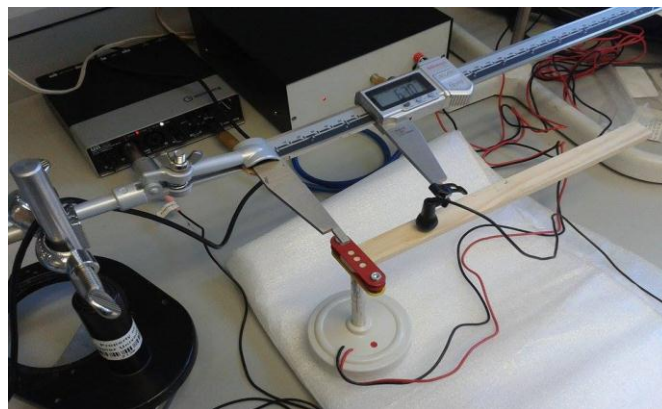
III. PRIPREMA EKSPERIMENTA

Beli bor (*Pinus sylvestris*) je vrsta drveta koja je testirana u ovom eksperimentu, sa uobičajenim Jangovim modulom elastičnosti od 6 do 16 kN/mm², i gustinom od 330 do 520 kg/m³ merenih pri uslovima od 12% vlage u uzorku [6]. U cilju određivanja dimenzija kao i mesta i načina pobude uzorka napravljen je FEM model eksperimentalne postavke

(Sl. 1). Kriterijumi koji su ključni pri utvrđivanju dimenzija su da ušestanost modova pada u frekvencijskom opsegu u kojem je moguće pobuđivati uzorak vibracijama, što se prvenstveno odnosi na sposobnost šejkera da pobudi donju granicu opsega, da je za analizirane modove zadovoljen kriterijum iskazan u (1), da način montiranja i tačka fiksiranja uzorka, bude kompatibilan sa ostalim korišćenim metodama za analizu karakteristika i da sa praktične strane sve bude lako za montiranje i merenje.



Sl.2 Uzorci u klimatskoj komori



Sl.3 Eksperimentalna postavka

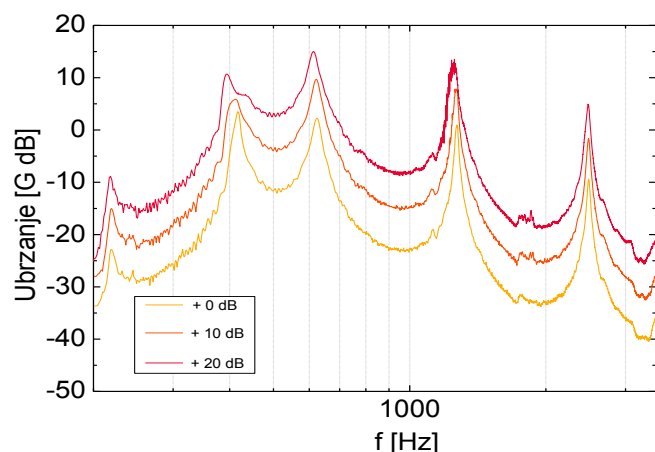
Za utvrđene dimenzije uzorka, koje su 247 x 17 x 6 mm, frekvencije prva dva moda su oko 320 Hz i 2000 Hz. Svi uzorci su sečeni od istog komada drveta u njegovom longitudinalnom pravcu. Uzorci su četiri nedelje pre početka merenja stajali u klimatskoj komori (Sl. 2), na temperaturi od 20 °C i relativnoj vlažnosti vazduha od 65 %, da bi se njihov sadržaj vlage stabilizovao. Za većinu sorti drveta pri ovakvim klimatskim uslovima uspostaviće se ravnotežno stanje sa 12 % vlage u drvetu, što se smatra referentni nivoom. Svakodnevno je praćena masa uzoraka, koja je direktno povezana sa sadržajem vlage, i meren im je Jangov moduo elastičnosti da bi se pronašli i uparili uzorci koji imaju što sličnije karakteristike.

IV. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Eksperimentalna postavka prikazana na Sl. 3 predstavlja aparaturu za snimanje odziva uzorka drveta u veoma bliskom

polju. Uzorak je kruto učvršćen za šejker sa kojim se drvo pobuđuje vibracijama. Na 2 mm iznad uzorka nalazi se mikروفон koji je pričvršćen za digitalni nonijus na čijem klizaču može slobodno da se kreće dužinom celog uzorka. Klizanjem mikrofona menja mu se položaj dok se čitanjem sa displeja digitalnog nonijusa može uvek znati njegova tačna pozicija što omogućava brzo i precizno kretanja od tačke do tačke prilikom merenja. Ono što je u velikoj meri doprinelo skraćivanju postupka merenja je skraćenje signala pobude. Umesto sekvence od 60 s roze šuma koji je do sada korišćen pri merenjima [4], upotrebljen je *sinesweep* signal u trajanju od 2s. Ovakva vrsta pobude ispostavila se kao bolja jer, osim toga što štedi vreme potrebno za merenje, omogućava bolju vizualizaciju pošto se modovi uzorka pobuđeni na ovaj način jasnije izdiferenciraju u spektrima snimljenih signala.

Sa obzirom da je meren veliki broj uzoraka nakon i u toku različitih tretmana, bilo je potrebno ostvariti potpuno istu pobudu pri svakom merenju kako bi se i najmanje promene u vibroakustičkim performansama mogle zabeležiti. Signal pojačavača podešen je tako da za pobudu na 200 Hz sinusnog signala na svom izlazu da napon od 8V, što na neopterećenom šejkeru kao rezultat daje pomeraj od 32 μm . Različiti nivoi pobude daju i različite odzive uzorka, što se ne odnosi smo na intenzitet odziva, već i na promenu rezonantnih frekvencija modova oscilovanja (Sl. 4). Na slici je prikazan odziv uzorka za tri različita nivoa pobude sniman akcelerometrom pričvršćenim za njega. Za jače nivoe može se primetiti da se rezonance pomeraju ka nižim učestanostima.

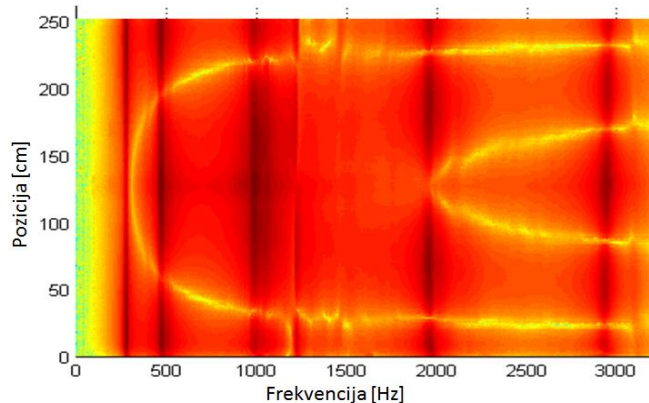


Sl.4 Odziv uzorka na različite nivoe pobude

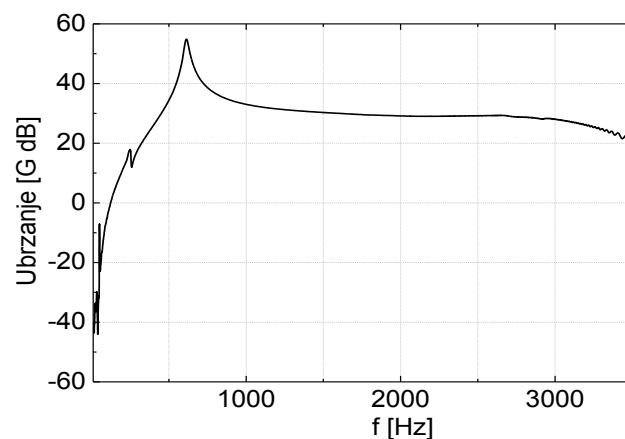
V. REZULTATI

Preciznost pozicioniranja mikrofona omogućava visoku prostornu rezoluciju jer je mikروفон moguće pomerati u skokovima od po 1 mm. Za svaku snimljenu tačku računa se spektar sa frekvencijskom rezolucijom od 1 Hz u frekvencijskom opsegu od 1 do 3200 Hz i rezultati se smeštaju u matricu 3200xNxP, gde N predstavlja broj tačaka u kojima se meri, dok je P broj ponovljenih merenja. Za prostornu rezoluciju od 1 mm vrši se snimanje u 248 tačaka (N=248). Rezultati skeniranja uzorka u 1 mm rezoluciji prikazani su na Sl. 5. Tamno crvenom bojom prikazani su maksimumi, dok su žutom predstavljani minimumi odnosno

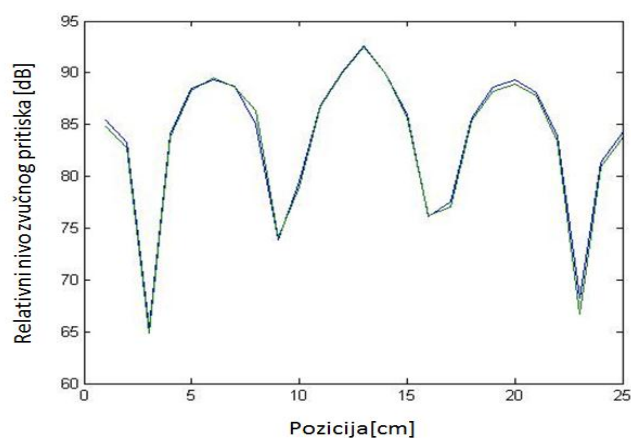
čvorovi stojećih talasa. Na slici se pored modova oscilovanja uzorka vide i rezonance šejkera koji pobuđuje sistem. Frekvencijska karakteristika neopterećene pobude merena akcelerometrom prikačenim direktno na šejker prikazana je na Sl. 6. Šejker ima izraženu rezonancu pa se modovi pobude preslikavaju na ukupni odziv uzorka.



Sl.5 Vizualizacija modova oscilovanja uzorka snimanjem zvuka u veoma bliskom polju .

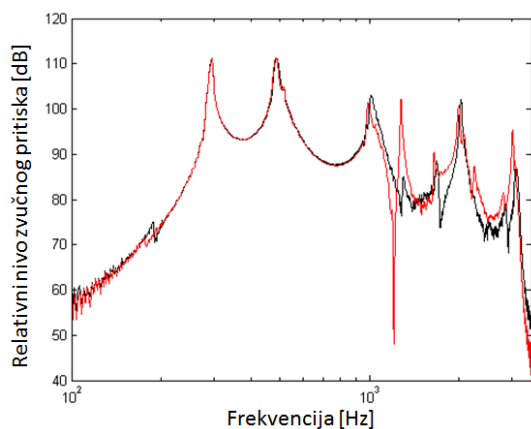


Sl.6 Frekvencijska karakteristika neopterećenog šejkera koji se koristi za pobudu uzorka drveta

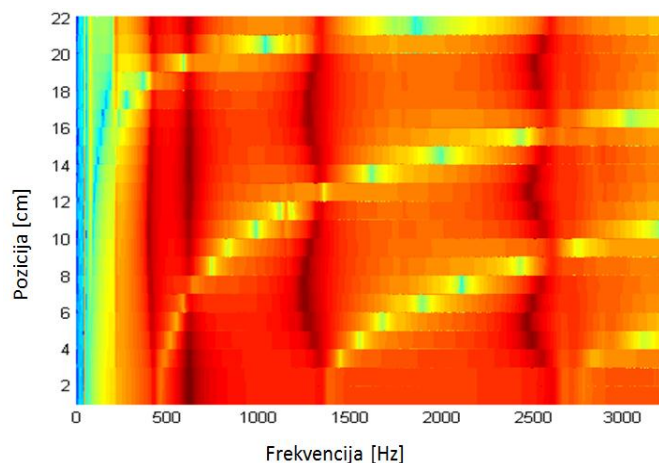


Sl.7 Ponovljivost merenja. Prostorna raspodela relativnog nivoa zvučnog pritiska za mod na frekvenciji 2887 Hz. Dva ponovljena merenja

Skeniranje u 1 mm rezoluciji zahteva dosta vremena pa su uzorci, kada je potrebno brzo izvršiti merenje, skenirani i sa manjom prostornom rezolucijom u skokovima od po 1 cm. Na Sl. 7 je prikazana prostorna raspodela relativnog nivoa zvučnog pritiska za mod na frekvenciji 2887 Hz, koji je skeniran u 1 cm rezoluciji za dva ponovljena merenja istog uzorka. Razlike koje se javljaju u pojedinim tačkama za dva ponovljena merenja manje su od 1 dB.



Sl.8 Promena frekvencijske karakteristike usled procesa sušenja uzorka.



Sl.9 Vizualizacija modova oscilovanja snimanjem odziva akcelerometrom vezanim direktno na uzorak

Na Sl. 8 prikazana je promena frekvencijske karakteristike usled procesa sušenja uzorka. Karakteristika prikazana crnom bojom predstavlja odziv uzorka neposredno nakon njegovog vađenja iz klimatske komore, dok je crvenom bojom predstavljena karakteristika drveta nakon dva sata provedenih van komore. Relativna vlažnost vazduha u laboratoriji je niža nego u klimatskoj komori (oko 33 %) te je promena relativnog sadržaja vlage u uzorku rezultovala drugačijom frekvencijskom karakteristikom što je posledica promene mase, krutosti i poprečnog preseka uzorka.

Na Sl. 9 predstavljeni su rezultati skeniranja modova uzorka sniman akcelerometrom. Drvena letvica, pričvršćena

na njenom kraju za šejker, skenirana je sa prostornom rezolucijom od 1 cm. Procedura je ista kao i u slučaju skeniranja u veoma bliskom polju, sa tim što je beležen signal vibracija akcelerometrom, a ne zvučni signal u veoma bliskom polju. Akcelerometar se postavljao direktno na uzorak u tačkama po dužini analizirane letvice. Masa akcelerometra je 0,9 g. Sa prikazanog grafika se vidi da dodatna masa pričvršćenog akcelerometra, u zavisnosti od njegove pozicije montiranja na uzorak, utiče na frekvencijski odziv uzorka menjajući frekvencije njegovih rezonanci.

VI. ZAKLJUČAK

Snimanje modova merenjem u veoma bliskom polju pokazalo se kao metoda koja je upotrebljiva u analizi vibroakustičkih karakteristika drveta. Beskontaktna merenja, dobra ponovljivost i jednostavnost su prednosti ovakvog postupka merenja. Nedostatci snimanja u veoma bliskom polju su neophodno prisustva pobude, koja sama po sebi iziskuje fiksiranje uzorka u jednoj ili više tačaka. Iz tog razloga nemoguće je snimiti akustički odziv uzorka koji bez ukrućenja slobodno osciluje. Pobuda sa svojim rezonancama utiče i na odziv sistema pa se obavezno mora imati u vidu radni frekvencijski opseg pobude pri analizama dobijenih rezultata.

LITERATURA

- [1] E.F.F. Chladni, „Entdeckungen über die Theorie des Klanges“, Leipzig, bey Weidmanns Erben und Reich, 1787.
- [2] ASTM E1876, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration
- [3] J. Prezelj, P. Lipar, A. Belšak, and M. Čudina, „On acoustic very near field measurements“, *Mech. Syst. Signal Processing* 40, 194–207, 2013.
- [4] F. Pantelić, J. Prezelj, „Hair tension influence on the vibroacoustic properties of the double bass bow“, *J. Acoust. Soc. Am.* 136(4): EL288 October 2014.
- [5] V. Bucur, „Acoustics of Wood“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [6] A. Ranta-Maunus, J.K. Denzler, P. Stapel, „Strength of European Timber, Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project“, VTT Working Papers 179, ISBN 978-951-38-7521-3, 2011.

ABSTRACT

It is possible to achieve a good visualization of vibration modes by microphone scanning of a vibration excited sample of wood in very near field. The experimental settings, shown in this paper, were used for wood properties characterization and observation of the variations in its vibroacoustic parameters due to controlled humidity changes. A large number of measurements in these tests require a fast and easy method with satisfactory reproducibility and measurement precision. Meeting these requirements, wood sample measurements in the very near field were obtained.

Analysis of acoustical properties of wood and mode identification by sample scanning in the very near field

Filip Pantelić, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić,
Daniel Ridley-Ellis