



2013.
GODINA
LVI



GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

4

BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH OF MATERIALS AND STRUCTURES



DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

Odlukom Skupštine ***Društva za ispitivanje materijala i konstrukcija***, održane 19. aprila 2011. godine u Beogradu, promenjeno je ime časopisa **Materijali i konstrukcije** i od sada će se časopis publikovati pod imenom **Građevinski materijali i konstrukcije**.

According to the decision of the Assembly of the ***Society for Testing Materials and Structures***, at the meeting held on 19 April 2011 in Belgrade the name of the Journal **Materijali i konstrukcije** (Materials and Structures) is changed into **Building Materials and Structures**.

Professor Radomir Folic
Editor-in-Chief

GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Professor **Radomir Folić**, Editor in-Chief
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Serbia
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
e-mail: folic@uns.ac.rs

Professor **Mirjana Malešev**, Deputy editor
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad,
Serbia
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
e-mail: miram@uns.ac.rs

Dr **Ksenija Janković**
Institute for Testing Materials, Belgrade, Serbia
Institut za ispitivanje materijala, Beograd, Srbija

Dr **Jose Adam, ICITECH**
Department of Construction Engineering, Valencia,
Spain.

Professor **Radu Banchila**
Dep. of Civil Eng. „Politehnica“ University of
Timisoara, Romania

Professor **Dubravka Bjegović**
Civil Engineering Institute of Croatia, Zagreb, Croatia

Assoc. professor **Meri Cvetkovska**
Faculty of Civil Eng. University "St Kiril and Metodij",
Skopje, Macedonia

Professor **Michael Forde**
University of Edinburgh, Dep. of Environmental Eng.
UK

Dr **Vladimir Gocevski**
Hydro-Quebec, Motreal, Canda

Professor **Miklos Ivanyi**
University of Pecs, Faculty of Engineering,
Hungary.

Professor **Asterios Liolios**
Democritus University of Thrace, Faculty of Civil
Eng., Greece

Predrag Popović
Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook,
Illinois, USA.

Professor **Tom Schanz**
Ruhr University of Bochum, Germany

Professor **Valeriu Stoin**
Dep. of Civil Eng. „Poloitehnica“ University of
Timisoara, Romania

Acad. Professor **Miha Tomažević**, SNB and CEI,
Slovenian Academy of Sciences and Arts,

Professor **Mihailo Trifunac**, Civil Eng.
Department University of Southern California, Los
Angeles, USA

Lektori za srpski jezik: Dr **Miloš Zubac**, profesor

Proofreader: **Aleksandra Borojev**, profesor
Prof. **Jelisaveta Šafranj**, Ph D

Technical editor: **Stoja Todorovic**, e-mail: saska@imk.grf.bg.ac.rs

PUBLISHER

Society for Materials and Structures Testing of Serbia, 11000 Belgrade, Kneza Milosa 9
Telephone: 381 11/3242-589; e-mail: dimk@ptt.rs, veb sajt: www.dimk.rs

REVIEWERS: All papers were reviewed
COVER: Zgrada Rektorata Univerziteta u Novom Sadu. završena 2013.
Rector's building of the University of Novi Sad, inished 2013.

Financial supports: Ministry of Scientific and Technological Development of the Republic of Serbia

DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
 SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
 JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

SADRŽAJ

Jovan B. PAPIĆ Verka PROLOVIĆ Ljupčo DIMITRIJEVSKI Dragan LUKIĆ Zoran BONIĆ PRILOG IZRADI NACIONALNOG ANEKSA EVROKODU 7 - IZ ASPEKTA POTPORNIH ZIDOVA Stručni rad	3
Mladen ĆOSIĆ Stanko BRČIĆ TIPOLOGIJA NSPA PUSHOVER KRIVIH I POVRŠI ZA 3D SEIZMIČKI ODGOVOR KONSTRUKCIJA PREMA PERFORMANSAMA Originalni naučni rad	19
Mirjana TOMIĆIĆ-TORLAKOVIĆ MOGUĆOSTI POBOLJŠANJA PLANUMA ŽELEZNIČKE PRUGE Stručni rad	39
Uputstvo autorima	63

CONTENTS

Jovan B. PAPIĆ Verka PROLOVIĆ Ljupčo DIMITRIJEVSKI Dragan LUKIĆ Zoran BONIĆ TOWARDS PREPARATION OF NATIONAL ANNEX TO EUROCODE 7 - FROM ASPECT OF RETAINING WALLS Professional paper	3
Mladen COSIĆ Stanko BRCIĆ TYPOLOGY OF NSPA PUSHOVER CURVES AND SURFACES FOR 3D PERFORMANCE-BASED SEISMIC RESPONSE OF STRUCTURES Original scientific paper	19
Mirjana TOMIĆIĆ-TORLAKOVIĆ IMPROVEMENT ALTERNATIVES FOR RAILWAY TRACK FORMATION Professional paper	39
Preview report	63

CIP - Каталогизacija u publikaciji
 Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.1

GRAĐEVINSKI materijali i konstrukcije :
 časopis za istraživanja u oblasti materijala
 i konstrukcija = Building Materials and
 Structures : journal for research of
 materials and structures / editor-in-chief
 Radimir Folić. - God. 54, br. 1 (2011)-
 - Beograd (Kneza Miloša 9) : Društvo za
 ispitivanje i istraživanje materijala i
 konstrukcija Srbije, 2011- (Novi Beograd :
 Hektor print). - 30 cm

Tromesečno. - Je nastavak: Materijali i
 konstrukcije = ISSN 0543-0798
 ISSN 2217-8139 = Građevinski materijali i
 konstrukcije
 COBISS.SR-ID 188695820



PRILOG IZRADI NACIONALNOG ANEKSA EVROKODU 7 – IZ ASPEKTA POTPORNIH ZIDOVA

TOWARDS PREPARATION OF NATIONAL ANNEX TO EUROCODE 7 - FROM ASPECT OF RETAINING WALLS

Jovan B. PAPIĆ
Verka PROLOVIĆ
Ljupčo DIMITRIEVSKI
Dragan LUKIĆ
Zoran BONIĆ

STRUČNI RAD
PROFESSIONAL PAPER
UDK: 624.131.52 ; 006.44:624.1
ID: 204280076

1 UVOD

Evrokod 7 (EK 7) sačinjavaju dva dela: u prvom delu obrađuju se opšta pravila u geotehničkom dimenzioniranju, dok su u drugom obuhvaćena laboratorijska i terenska ispitivanja. Oba sadrže podatke koji su ostavljeni na izbor državama, tzv. Nacionalno određene parametre (NOP), čiji izbor zavisi od dosadašnjih „lokalnih” proračunskih tradicija, ispitivanja, sigurnosti, trajnosti i ekonomičnosti objekata, kao i od preporučenih vrednosti koje Evropska unija traži da budu primenjene. Osim toga, usled različitih geoloških, geomehaničkih, geografskih, klimatskih i drugih uslova koji su doveli do razvijanja različitih geotehničkih metoda, modela, istraživanja i drugog na teritoriji Evrope, a koji su usporili razvoj i prihvatanje EK 7, u prvom delu ponuđena su i tri postupka dimenzioniranja geotehničkih konstrukcija. Time je svakoj državi omogućeno da izabere najadekvat-

Asist. dr Jovan Papić, dipl.inž.građ., Univerzitet „Sv. Kiril i Metodij”, Građevinski fakultet, Katedra za geotehniku, bul. Partizanski odredi br.24, Skoplje, R. Makedonija; e-pošta: papic@gf.ukim.edu.mk
Prof. dr Verka Prolović, dipl.inž.građ., Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Katedra za građevinsku geotehniku, ul. Aleksandra Medvedeva br.14, Niš, R. Srbija
Prof. dr Ljupčo Dimitrievski, dipl.inž.građ., Univerzitet „Sv. Kiril i Metodij”, Građevinski fakultet, Katedra za geotehniku, bul. Partizanski odredi br.24, Skoplje, R. Makedonija
Prof. dr Dragan Lukić, dipl.inž.građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet – Subotica, Katedra za geotehniku i saobraćajnice, Kozaračka 2/a, Subotica, R. Srbija
Doc. dr Zoran Bonić, dipl.inž.građ., Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Katedra za građevinsku geotehniku, ul. Aleksandra Medvedeva br.14, Niš, R. Srbija

1 INTRODUCTION

Eurocode 7 (EC 7) consists of two parts: the first part elaborates general rules in geotechnical design, while the second includes laboratory and field testing. Both parts include data which are left to the choice of particular countries - so called nationally determined parameters (NDP), whose selection depends on present "local" designing traditions, testing, safety, durability and cost-effectiveness of structures, as well on the values recommended by EU. Besides, due to various geological, geomechanical, geographical, climatic and other conditions that led to the development of different geotechnical methods, models, investigations etc. in Europe, which slowed down the development and adoption of the EC7, the first part introduces three designing approaches for geotechnical structures. Thus, every country is free to select the most appropriate design

Asist. dr Jovan Papić, Civ.Eng., University „St Kiril i Metodij”, Faculty of Civil Engineering, Chair of geotechnics, bul. Partizanski odredi 24, Skoplje, R. Makedonija; e-mail: papic@gf.ukim.edu.mk
Prof. dr Verka Prolović, Civ.Eng., University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Chair of geotechnical constructions, ul. Aleksandra Medvedeva 14, Niš, R. Srbija
Prof. dr Ljupčo Dimitrievski, Civ.Eng., University „St Kiril i Metodij”, Faculty of Civil Engineering, Chair of geotechnics, bul. Partizanski odredi 24, Skoplje, R. Makedonija
Prof. dr Dragan Lukić, Civ.Eng., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering – Subotica, Chair of geotechnical and traffic artery, Kozaračka 2/a, Subotica, R. Srbija
Doc. dr Zoran Bonić, Civ.Eng., University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Chair of geotechnical constructions, ul. Aleksandra Medvedeva 14, Niš, R. Srbija

niji proračunski postupak (PP) i da delimično promeni navedene parametre, među kojima su i parcijalni koeficijenti (PK) koji se dodeljuju karakterističnim vrednostima parametara, usled čijeg se rasporeda PP međusobno razlikuju. To se čini izradom Nacionalnih aneksa (NA), koje svaka zemlja, saglasno svojim zahtevima, priprema nakon objavljivanja EK. Pre donošenja konačne odluke o odgovarajućim PP i NOP, neophodno je uraditi analize, proračune i verifikacije. Metodologija je opisana u sledećim redovima.

Prilikom određivanja odgovarajućeg PP, dotičnu geotehničku konstrukciju treba uporedno analizirati s postojećim i s ponuđenim metodama, iz čega će se ustanoviti koji je postupak najbliži dosadašnjem „stil” proračuna. Kompatibilnost „starog” i novog metoda proračuna vodi ka odabiru PP koji će omogućiti inženjerima da nastave proračune na način sličan aktuelnom. Nakon toga, sledi određivanje iznosa PK koji se utvrđuje iz uslova dobijanja približno istih dimenzija konstrukcija, preko dosadašnjeg i gore predloženog PP. Ovaj preduslov je opravdan jer je dosadašnja praksa pokazala uspešnost primenjenih „zastarelih” postupaka i koeficijenata i dokazala ih višedecenijskom upotrebljivošću objekata, a time bi se paralelno stabilnost i sigurnost objekata zadržala i obezbedila – i fizički i pravno – jer ostaje u nadležnosti države. Ujedno, predloženi PP i PK biće prihvatljivi i iz aspekta naknadnog proračuna postojećih konstrukcija prilikom bilo kakve dogradnje/nadgradnje, sanacije ili rekonstrukcije. Zahvaljujući tome što će se nakon sličnih proračuna (po kojima je objekat nekada projektovan i izgrađen, i po kojima se na objektu trenutno rade intervencije), dobiti približno iste dimenzije. U suprotnom, usvajanje neodgovarajućih PP i PK prouzrokovalo bi disperziju između dimenzija, ugrozilo sigurnost i realizaciju objekata, a i stvorilo bi konfuziju među projektantima i izvođačima. Pritom, treba imati u vidu da različiti PP sa odgovarajućim PK ne dovode uvek do istog ili sličnog stepena sigurnosti i dimenzija koji su dosad bili obezbeđeni (npr. globalnim faktorom) [16], pa ukoliko se određene konstrukcije realizuju prema njima, izvesno je da bi bile nesigurne, zbog čega je neophodan oprez prilikom izbora PP i određivanja PK.

Međutim, činjenica da su evrokodovi trenutno aktuelni proračunski normativi u Evropskoj uniji, ne svrstava ih neminovno u kategoriju savršenih, što se odnosi i na EK 7. Naravno zbog toga što je njegova priprema trajala nekoliko decenija, pa je jasno da je morao da ostane „imun” na unošenje u međuvremenu postignutih naučnih dostignuća. Takođe, na neke nedostatke i ograničenja stidljivo je ukazano u samom njegovom tekstu, pa su upravo zato propisane „revizije” na nekoliko godina kako bi se „evolucija” dirigovala. Tokom njih će moći da se dodaju poglavlja koja trenutno nedostaju, a koja jesu potrebna, pa će pojedine prisutne oblasti detaljnije moći da se opišu, te da se predloži prihvatanje određenog metoda za proračun sleganja i slično. Iz vizure ovde obrađivanih potpornih konstrukcija, to se dominantno odnosi na određivanje parametara smičuće otpornosti, definisanje merodavnih i za proračun koeficijenata zemljanih pritisaka. Deo njih je delimično obuhvaćen u EK 7-1, a i u njegovim aneksima, o kojima se u NA takođe treba izneti stav. Imajući u vidu da su ostali aneksi informativnog karaktera, sa izuzetkom dodatka A koji je obavezan, moguće je uvesti

approach (DA) and partially change parameters, including partial factors (PF) assigned to the characteristic values of parameters, and whose order causes differences between design approaches. This is done with preparation of National annexes (NA) which every country develops after publishing the EC, according to its own demands. Before making final decision on appropriate DA and NDP, it is necessary to perform analyses, calculations and verifications, whose methodology is described in the following part.

When determining appropriate DA, a geotechnical structure should be comparatively analyzed using current and proposed methods, which determines the closest approaches to the actual designing "style". The compatibility between "old" and new method leads to the selection of DA that shall provide engineers to continue with design in a manner that is similar to the current one. This is followed by determination of the PF, based on the conditions for gaining approximately similar dimensions of the structures using actual and proposed DA. This prerequisite is valid because present practice has shown efficacy of "outdated" approaches and factors, proved with serviceability of the structures; besides that, the stability and safety shall be provided and sustained both physically and legally, because it remains in state competence. Moreover, the proposed DA and PF shall also be acceptable for any additional design of existing structures due to upgrade, rehabilitation or reconstruction. This comes from the fact that similar designs (once used for designing and building purposes and now to perform interventions) will obtain similar dimensions. On the contrary, the adoption of inappropriate DA and PF causes dispersion among designs and threatens the safety and implementation of a structure, but also causes confusion between designers and contractors. It should be emphasized that different DA with corresponding PF do not always lead to the same or similar degree of safety and dimensions provided thus far (e.g., with global factor) [16], so if particular structures are built according to them, they could become unstable. Thus, the selection of DA and PF should be performed with great caution.

However, the fact that eurocodes are recent standards in designing within EU does not make them perfect, and that also stands for EC7. This is particularly because of the fact that several decades took for their preparation, so it is clear that EC7 had to stay "immune" to any possible introduction into the scientific attainments achieved thus far. Besides that, some shortcomings and limitations were suggested in the original version of paper, which demanded some "revisions" to guide its "evolution". Thus, it would be allowed to incorporate chapters that are currently missing but required, to describe in greater extent some of the topics, propose acceptance of particular method for calculation of settlement, etc. From the point of view of retaining structures elaborated in this paper, it is mostly related to determination of shearing strength parameters, definition of relevant values and calculation of coefficients for earth pressures. Some of them are explained in EC7-1 and its annexes, but they should also be commented in NA. Having in mind that all annexes are informative (except the mandatory annex A), it is possible to introduce enhanced methods for calculation of required parameters (e.g., non-linear instead of Mohr-

i poboljšane metode određivanja ili proračuna potrebnih parametara (npr. nelinearnu umesto Mor-Kulombovu anvelopu loma).

U radu su tretirani opisani geotehnički aspekti dimenzioniranja potpornih konstrukcija, na koje se nadovezuju oni armirano-betonski, koji su detaljnije obuhvaćeni Evrokodom 2, a međusobno sinhronizovani putem EK 0 i EK 1.

2 OPIS PRORAČUNSKIH POSTUPAKA

U proračunskom postupku 1 (PP1) potrebno je ispitati dve kombinacije PK:

$$A1 + M1 + R1 \quad (1)$$

$$A2 + M2 + R1 \quad (2)$$

gde A_i , M_i i R_i redosledno označavaju skupove PK kojima se množe ili dele karakteristične vrednosti akcija (dejtva), materijala i otpora, pretvarajući ih u proračunske. Njihove izvorne vrednosti su date u [3] i [4] i iznose:

Coulomb failure envelope).

This paper presents the described geotechnical aspects for design of retaining structures and reinforced concrete elements (covered in more depth within Eurocode 2), which are synchronized under EC0 and EC1.

2 DESCRIPTIONS OF DESIGN APPROACHES

Design approach 1 (DA1) requires testing of two combinations of PF:

Where, A_i , M_i and R_i indicate sets of PF to multiply or divide characteristic values of actions (impacts), materials and resistance, turning them into design values. Their original values are shown in [3] and [4]:

Tabela 1. Parcijalni koeficijenti za dejstva (γ_F) ili efekte od dejstva (γ_E)
Table 1. Partial factors for actions (γ_F) or effects of actions (γ_E)

Dejstvo Action		Oznaka Symbol	Skup Set	
			A1	A2
Trajno Permanent	Nepovoljno Unfavourable	γ_G	1.35	1.0
	Povoljno Favourable		1.0	1.0
Povremeno Variable	Nepovoljno Unfavourable	γ_Q	1.5	1.3
	Povoljno Favourable		0	0

Tabela 2. Parcijalni koeficijenti za parametre tla (γ_M)
Table 2. Partial factors for ground parameters (γ_M)

Parametar tla Soil parameter	Oznaka Symbol	Skup Set	
		M1	M2
Efektivni ugao otpornosti na smicanje ^a Effective angle of shearing resistance ^a	$\gamma_{\varphi'}$	1.0	1.25
Efektivna kohezija Effective cohesion	γ_c	1.0	1.25
Nedrenirana otpornost na smicanje Undrained shear strength	γ_{cu}	1.0	1.4
Jednoaksijalna pritiska čvrstoća Unconfined strength	γ_{qu}	1.0	1.4
Jedinična težina Weight density	γ_γ	1.0	1.0
^a Ovaj koeficijent se primenjuje na $\tan \varphi'$ ^a This factor is applied to $\tan \varphi'$			

Tabela 3. Parcijalni koeficijenti za otpore (γ_R)
Table 3. Partial factors for resistance (γ_R)

Otpor Resistance	Oznaka Symbol	Skup Set		
		R1	R2	R3
Slom u podtlu Bearing capacity	$\gamma_{R,v}$	1.0	1.4	1.0
Klizanje Sliding resistance	$\gamma_{R,h}$	1.0	1.1	1.0

Kombinacija 1 (PP1 K1) tretira nepovoljno odstupanje dejstava od njihovih karakterističnih vrednosti, dok se kombinacijom 2 (PP1 K2) obezbeđuje sigurnost od nepovoljnog odstupanja parametara smičuće otpornosti (PSO) tla od njihovih karakterističnih vrednosti i od nesavršenosti u proračunskom modelu. Kako bi proračun bio u skladu sa EK 7, potrebno je napraviti analize za obe kombinacije PK, što znači da se ista konstrukcija mora dva puta računati, mada je neretko očigledno koja je od njih merodavna. Ovo predstavlja nedostatak sa inženjerske tačke gledišta, što se naročito odnosi na naš region (Srbija, Makedonija, Crna Gora, BiH itd.), gde apsolutno nema tradiciju primene, jer se uvek realizuje samo jedan proračun, zbog čega se on i ne treba razmatrati kao potencijalan – PP.

U postupku 2 (PP2) primenjuju se sledeći kompleti

$$A1 + M1 + R2, \quad (3)$$

pa se PK zadaju i spoljašnjim silama ili efektima od njih i otporu tla. U PP2, PK vezani za geotehnička dejstva i njihove efekte isti su sa onima koji se nanose dejstvima na konstrukcije ili s konstrukcije u PP1 K1. Karakteristične vrednosti PSO ujedno su i proračunske, dok se otpornost tla u vertikalnom i horizontalnom pravcu smanjuje za 40 %, odnosno 10 %. Ovde postoje dva načina sprovođenja proračuna. Naime, u izvornom postupku 2, PK se nanose dejstvima već na početku, zbog čega se i analiza vrši s proračunskim vrednostima, što, međutim, vodi u određenu nelogičnost u pogledu nosivosti [20], pa je pripremljena alternativa u vidu PP2*, gde se najveći deo proračuna sprovodi s karakterističnim vrednostima jer se PK priključuju tek u završnici analize. Ovaj postupak ujedno odgovara i jednom delu naših dosadašnjih projektantskih navika s obzirom na to što nanošenje PK na kraju proračuna nalikuje konceptu globalnog faktora.

Postupak 3 (PP3) zadržava principe iz PP1, ali prevazilazi njegov nedostatak, pošto je potreban samo jedan proračun

$$A1 \text{ or } A2 + M2 + R3 \quad (4)$$

u kom se PK nanose i silama ili efektima i PSO već na početku proračuna.

3 ODREĐIVANJE ODGOVARAJUĆEG PRORAČUNSKOG POSTUPKA

Potporni zidovi su tipičan primer ispunjavanja globalnih faktora sigurnosti, čije se dimenzioniranje svodi

Combination 1 (DA1 C1) treats unfavourable deviation of actions from their characteristic values, while combination 2 (DA1 C2) precludes unfavourable deviations of parameters of shearing resistance (PSR) of the ground from their characteristic values and imperfections in the design model. To bring calculations in line with the EC7, it is necessary to perform both analyses for PF and that implies that a single structure has to be calculated two times, even when it is obvious which calculation is valid. This poses disadvantage from engineering point of view, especially in our region (Serbia, Macedonia, Montenegro, Bosnia and Herzegovina etc.) where there is no tradition of its application, because it is common to perform only one calculation, so it should not be concerned as a possible DA.

DA2 uses following sets

so PF are assigned to external forces and their effects as well to soil resistance. In DA2, the partial factors related to geotechnical actions and their effects are equal to those caused by actions on the structure or from the structure in DA1 C1. The characteristic values for PSR are also design values, while the soil resistance in vertical and horizontal direction is decreased by 40% and 10%. But, there are two different modes to perform calculation. Namely, the PF in original DA2 are assigned to actions in the very beginning, so the analysis is performed with design values; yet, this leads to a certain inconsistency for bearing capacity [20], which implied the preparation of DA2* as an alternative solution; the most of calculation in DA2* is performed with characteristic values, because PF are incorporated at the final stage of analysis. In part, this approach is also suitable to our actual designing habits, because the assignment of PF at the end of calculation resembles the concept of a global factor.

DA3 employs principles from DA1, but also overcomes its shortcoming since only one design is required

where PF are assigned to forces and effects or PSR at the beginning of calculation.

3 FINDING APPROPRIATE DESIGN APPROACH

Retaining walls are typical examples for meeting the requirements of global factors of safety whose design is conducted by controlling contact and section stresses

na kontrolu kontaktnih i presečnih napona i provere stabilnosti klizanja, preturanja i one globalne. Novitet EK 7 predstavlja i isključivanje provere na prevrtanje iz GEO proračuna, jer se uslov za nju ispuni ukoliko je pitanje nosivosti podloge zadovoljeno [12]. Tačnije, ona se prebacuje u tzv. EQU probleme: pojava gubitka ravnoteže konstrukcije ili tla, gde su njihove čvrstoće neznajčajne u obezbeđivanju otpora. S praktične strane, to bi značilo da će se dimenzioniranje potpornih zidova ubrzati zbog smanjenja broja analiza.

Proračuni stabilnosti zidova prema globalnom faktoru sigurnosti daju određene smernice koje su od ključalnog značaja za izbor prihvatljivog PP, saglasno dosadašnjoj praksi inženjera. Pritom, imajući u vidu opise, izbor se ograničava na postupke 2 i 3. Međutim, oba imaju karakteristike koje ih i favorizuju, ali i ograničavaju kada je u pitanju usvajanje.

Prema klasičnom proračunskom modelu, prilikom analize stabilnosti na klizanje vrši se deljenje sila trenja na kontaktu osnove zida i tla i horizontalnih sila, i poređenje sa određenim globalnim faktorom sigurnosti. Višedecenijske navike, stečene njihovim korišćenjem, diriguju da iz kruga potencijalnih kandidata za izbor odgovarajućeg PP, pored PP1, treba isključiti i PP3 u kom se redukuje PSO, što se do sada nije radilo kod nas prilikom dimenzioniranja zidova.

U postupku 2 primenjuju se faktori na otpore, što ga čini primamljivim za usvajanje. Ali, glavno opterećenje koje stalno deluje na potporne zidove jeste zemljani pritisak koji je, između ostalog, u funkciji od čvrstoće tla, a ona zavisi od opterećenja [11], pa je zato važno da se kod njegovog određivanja ne vrši množenje opterećenja s PK. U suprotnom, rezultiralo bi modifikacijom pritiska bez mogućnosti njegove dalje kontrole, naročito prilikom analiza u MKE, što zahteva da se proračuni sprovode s njihovim karakterističnim vrednostima, čime se iz izbora izbacuje PP2, ali ne i PP2*, jer upravo on omogućava takav proračun. Ovo nalikuje aktuelnoj praksi, a položaj PK u jednačinama ionako podseća na globalni faktor sigurnosti. Dakle, kako bi bili dosledni tradiciji kada se koriste izvorne veličine sila i na kraju upoređuju otpori, poželjni PP locira se u onom sa oznakom 2*, kod koga se PK nanose na sile i otpore, ali tek na kraju proračuna, tako da se on, u najvećem delu, odvija primenom karakterističnih vrednosti, kao što je kod nas bilo i do sada. Ono što takođe ohrabruje jeste to što je najviše zemalja za dimenzioniranje potpornih zidova preporučilo upravo navedeni pristup. To je pristup koji je predložila Nemačka, a koji se zasniva na iskustvu od 80 godina projektovanja bez lomova, pa je stoga blizak korisnicima, što važi i za naš region.

Na osnovu navedenih razloga, PP 2* pozitivno je ocenjen i preporučen za analitički proračun zidova prema EK 7. Međutim, on ima ograničenu primenu u MKE programima koji imaju gotovo rutinsku primenu u geotecnici, ali ne toliko i kod samostalnog dimenzioniranja potpornih zidova. Iz aspekta MKE, kritika je generalno usmerena ka pristupu 2, a ne samo 2*, pošto su – i pored primene karakterističnih vrednosti – neophodne intervencije u proračunu ili nakon njega, usled potrebe redukcije otpora jer je jedna od sila i ona s pasivne strane, koja se u MKE automatski generiše i predstavlja usputnu proračunsku, a ne ulaznu veličinu. Naime, u tim softverima ne postoji mogućnost redukovanja otpora, pa se to treba ručno uraditi. Tako bi

and checking the sliding, overturning and overall stability. Novelty in EC7 is also the exclusion of checking of overturning from GEO design, since its requirement is fulfilled if requirements for sub grade bearing capacity are met [12]. Namely, it is transferred into so called EQU problems - instances of loss of structure or ground equilibrium, when their strength values are inconsiderable to provide resistance. From practical point of view the design of retaining walls should be performed much faster, due to the reduction of number of analysis.

Designs of wall stability according to the global factor of safety provide certain guidelines critical for selection of acceptable DA according to actual engineering practice. Thereby, having in mind descriptions, the selection is limited to DA2 and DA3. However, both approaches show some positive and negative features that affect their adoption.

Within classic design approach, the analysis of sliding stability involves division between forces of friction at the contact area between wall and ground with horizontal forces and comparison with particular global factor of safety. Traditional habits imply that selection of appropriate DA should exclude both DA1 and DA3 (in which PSR are reduced), that has never been the practice for wall designing in our region.

DA2 applies partial factors on resistance, which makes it favourable for acceptance. In addition, the earth pressure is main loading that constantly affects retaining walls. Among the others, it is a function of ground strength which depends on loadings [11]; thus it is important not to multiply loading by PF when determining its value. Otherwise, it would result with modification of pressure without possibility to control it, especially during analysis in FEM. Thus it is required to perform the calculations with their characteristic values, so the selection excludes DA2, but not DA2*, as it is the approach which enables such design. This is similar to actual practice, and the location of PF in equations resembles the global factor of safety. Thus, in order to be consistent with tradition when using original values of forces and comparing resistances at final stage, DA2* is set as favourable; PF in this approach are set for forces and resistances, but only at the final stage of designing, so it is mostly conducted with application of characteristic values, as it has been our common practice. Yet another encouraging fact is that most countries also recommend this approach for design of retaining wall. Germany has proposed this approach based on 80 years of design practice without any instance of failure, so it is also familiar to our region.

These are the reasons for positive assessment of DA2* and its recommendation for analytic design of walls according to EC7. However, its application is limited within FEM programs which are commonly used in geotechnics, but not that much when only retaining walls are designed. From FEM aspect, the criticism is generally directed towards DA2 (not only DA2*); besides application of characteristic values it is necessary to make some intervention during the design or afterwards due to the need to reduce the resistance as one of the forces from the passive side is automatically generated within FEM (result of calculation process, but not input value). Namely, these kinds of software prevent reduction of resistance, so it has to be done manually.

mogao da se dobije odnos između dejstva i otpora, kada je potrebno vršiti integrisanje reakcije tla na pasivnoj strani [1]. Međutim, kako za otpor i ne postoji dovoljno iskustva, potrebno je vremena i uporednih proračuna kako bi se ocenila pouzdanost usled zavisnosti od deformacija. Zato je preporučljivo da se oni paralelno provere i tradicionalnim načinom, jer ovi softveri prekidaju proračun kada se postigne numeričko granično stanje koje ne znači da je to i granično stanje tla [6]. Takođe, zbog nelinearnog ponašanja tla, ovaj PP u pojedinim slučajevima može dovesti do drastičnog odstupanja pasivnog pritiska od tačnih rešenja, a time i od rezultata postignutih sa ostalim PP [17].

Generalno, primena koncepta PK sigurnosti, saglasno novim standardima [2], veoma je važna za interakciju tlo–konstrukcija, jer je tlo prisutno kako na strani dejstva, tako i na strani otpora. Ali, treba podsetiti na to da se upravo prema evrokodovima zahteva jasno i nedvosmisleno razdvajanje dejstva i otpora, mada treba imati u vidu i to da se za dejstva može zapaziti princip „istog porekla sila”. U tom smislu, olakšavajuću okolnost u našem regionu predstavlja to što se u dosadašnjim proračunima potpornih zidova pasivni pritisak najčešće nije uzimao u obzir. U EK 7-1, preko tačke 9.3.2.2, omogućava se nastavak takvih naših običaja, što se i preporučuje da se usvoji, čime se izbegavaju i pojedine zamke koje se mogu javiti u kompjuterskim programima zasnovanim na MKE, a na koje je, međutim, PP 3 imun. Ovo je i jedan od razloga što se predlaže kao alternativa PP 2* prilikom proračuna zidova u MKE, jer su postupci u kojima se PK nanosi trajnim nepovoljnim dejstvima problematični za numeričke analize. Među ostalim „plusevima”, jeste i to što se u PP 3 geotehnička dejstva ne menjaju, pa je on identičan PP 1 K 2, koja je najčešće merodavna u PP 1. Usled opisanog, predlaže se da se prilikom eventualnih numeričkih analiza potpornih zidova sa MKE primenjuje PP 3, koji je veoma zahvalan za takve proračune, te ga je kao rešenje već ponudila i Austrija [13].

Iako su obrazloženi razlozi usvajanja PP 2* za potporne zidove, neophodno ih je potkrepiti i opravdati, što se i čini u nastavku teksta, gde se ujedno daju i izvodi iz analitičkih proračuna putem kojih su utvrđene vrednosti PK, potrebne da obezbede dosadašnje dimenzije, nosivost i stabilnost zidova.

4 ODREĐIVANJE VREDNOSTI PARCIJALNIH KOEFICIJENATA

Dosadašnji brojni proračuni, a i praksa, pokazali su da je kod potpornih zidova najčešće kritična stabilnost na klizanje koja se proračunava kao

$$\eta = \frac{\sum V \cdot \tan \phi}{\sum H} \geq 1,50 \quad \text{bez uzimanja pasivnog pritiska (otpora) u obzir (u suprotnom - 2,00)} \quad (5)$$

without considering passive pressure (in contrary - 2,00)

Budući da zbog izvođačkih, rekonstrukcijskih ili hidroloških razloga prisustvo pasivnog pritiska nije „zagarantovano” sve vreme, u analizi će se pasivni otpor zanemariti. Ovo se preporučuje i u EK7, gde se ukazuje na to da treba uzeti u obzir moguće uklanjanje tla ispred zida zbog iskopa ili erozije, kao i na to da se visina na kojoj se javlja pasivni pritisak treba smanjiti za 50 cm. Prikazana jednačina, primenom usvojenog PP2* i onih

Thus, the relation between action and resistance can be gained, when integration of reactions of the ground on a passive side is required [1]. However, since there is insufficient experience considering the resistance, it would take time and comparative calculations to estimate reliability due to dependence on deformations. So it is also recommended to perform traditional comparative check, because the software stops the calculation after obtaining numerical limit state, which is unlikely the limit state of the ground [6]. Due to non linear behaviour of the ground, this DA may also lead to extreme deviation of the passive pressure from accurate results, and thus, from the results gained in other DA [17].

Generally, the application of the concept of PF of safety according to new standards [2] is very important for the ground-structure interaction, because the ground is present both on the side of action and resistance. But, it should be emphasised that eurocodes require clear distinction between action and resistance, although the principle of the "same origin of forces" can stand for the actions. In this regard, retaining wall design practice in our region thus far failed to take passive pressure into consideration. EC7-1 (9.3.2.2) allows continuation of such common practice and it is recommended for adoption as it avoids some flaws that may occur in computer software based on FEM. This is one of the reasons to recommend this approach as an alternative to DA2* for wall design in FEM, because procedures in which PF is set to permanent unfavourable actions pose problems for numerical analysis. Yet another advantage is that geotechnical actions in DA3 sustain, thus making it identical to DA1 C2, which is commonly relevant in DA1. All stated suggest application of DA3 for numerical analyses of retaining walls with FEM, as it is very suitable for this type of designs. Austria has already proposed such solution [13].

Although the reasons for adoption of DA2* for retaining walls are explained, it is also necessary to offer some further justification with excerpts from analytic calculations used to define values of PF required to obtain dimensions, bearing capacity and stability of the walls.

4 DETERMINATIONS OF VALUES OF PARTIAL FACTORS

Until now, numerous designs and practices have shown that the most critical part concerning retaining walls is sliding stability, calculated as:

Considering that the presence of passive pressure is not "guaranteed" all the time (due to building, reconstruction or hydrological reasons), the passive pressure will be omitted. This is also recommended in EC7, with suggestion to take into consideration eventual removal of ground in front of the wall (because of excavation or erosion); it is also suggested that the height of occurrence of the passive pressure should be decreased

PK za dejstva predloženih u EK 7, za česte slučajeve u praksi imala bi sledeći oblik (pri čemu je $\tan \varphi_d = \tan \varphi$):

$$\frac{\sum V_d \cdot \tan \phi_d}{\gamma_{R,h} \cdot \sum H_d} = \frac{\sum \gamma_{G,fav} V \cdot \tan \phi}{\gamma_{R,h} \cdot \sum \gamma_{G,unfav} H} = \frac{\sum 1,0V \cdot \tan \phi}{\gamma_{R,h} \cdot \sum 1,35H} = 1,00 \quad (6)$$

odakle se izvodi da je

$$1,35\gamma_{R,h} = \frac{\sum V \cdot \tan \phi}{\sum H} \quad (7)$$

Izjednačavanjem nove i „početne” jednačine [(7) i (5)] po $\frac{\sum V \cdot \tan \phi}{\sum H}$, dobija se

$$1,35\gamma_{R,h} = 1,50 \quad (8)$$

iz koje sledi da je

$$\gamma_{R,h} = \frac{1,50}{1,35} = 1,1 \quad (9)$$

zbog čega se preporučuje da se za PK za klizanje $\gamma_{R,h}$ usvoji vrednost od 1,10. Ovaj iznos verifikovan je na još dva načina [14].

Inače, u analizama je neophodno izabrati najnepovoljniji mogući slučaj opterećenja, a to je kada su vertikalna i horizontalna promenljiva sila nezavisne međusobno, što omogućava da se vertikalna – kao povoljna za stabilnost, isključi iz proračuna [15]. Takođe, u našim proračunima pasivni pritisak nije uziman u obzir, što se može uzeti kao nastavak negovanja dosadašnje pozitivne tradicije i što je, svakako, na strani sigurnosti.

Ali, navedeni pristup određivanja PK ne može se primeniti prilikom određivanja iznosa PK za normalni otpor $\gamma_{R,v}$. Razlog je to što se za proračun nosivosti prema „Pravilniku o tehničkim normativima za temeljenje građevina” koristi jednačina u kojoj su prisutni parcijalni, a ne globalni faktori i gde ugao trenja figuriše u različitim delovima jednačine. Zbog pomenutih razloga, odlučeno je da se proračuni sprovedu u namenskom softveru za dimenzioniranje potpornih konstrukcija. Neki od komercijalnih već poseduju opciju proračuna prema evrokodovima, Među njima je i GEO5 koji, takođe, omogućava i to da se proračun sprovede i po drugim standardima, ali i da se prilagodi zahtevima korisnika. Ove prednosti su i primenjene u sledećoj analizi. U domenu najčešće prisutnih PSO tla $\varphi=15-25-35^\circ$, $c=0-10-20-30$ kPa, razmatrana su dva tipa potpornih zidova: gravitacioni betonski i konzolni armiranobetonski. Pretpostavljeno je da su oni visine 4 m, a analizirani su u uslovima bez spoljašnjeg opterećenja i sa spoljašnjim opterećenjem intenziteta $q=20$ kN/m². Dimenzije preseka određivane su iz uslova ispunjenja minimalnih globalnih faktora sigurnosti na prevrtanje, klizanje i nosivost čije su vrednosti zadate saglasno dosadašnjim standardima: 1,50, dok je nosivost temelja određivana prema „Pravilniku”. Stabilnost ovako dimenzioniranih konstrukcija proveravana je prema PP 2*, gde su uneti proračunati potrebni PK za horizontalni otpor $\gamma_{R,h}$ (dakle, za proveru stabilnosti na klizanje) u iznosu od 1,10 i predloženi PK u EK 7 za proveru nosivosti, odnosno redukovanje vertikalnog otpora u iznosu od 1,40. Na

by 50 cm. After application of accepted DA2* and PF for actions proposed in EC7, the above equation is as follows (where $\tan \varphi_d = \tan \varphi$):

deriving

Equalization of new and "starting" equation [(7) and (5)] by $\frac{\sum V \cdot \tan \phi}{\sum H}$, gains

which implies

Thus, it is recommended to adopt the value 1.10 for PF for sliding $\gamma_{R,h}$. This value is also additionally verified [14].

It is also necessary to select the most unfavourable possible case of loading in analysis, i.e. - when the vertical and horizontal forces are independent - which allows excluding vertical force from the design, as it is favourable for stability [15]. Moreover, our design did not take passive pressure into account, which can be seen as maintaining of our positive tradition and contribution to stability.

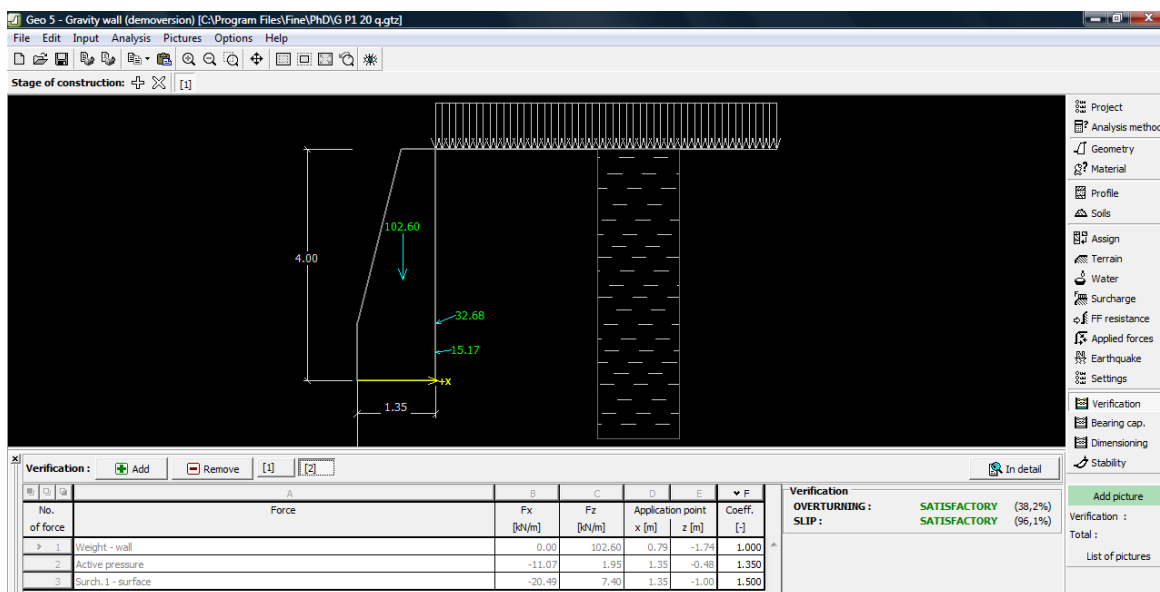
Still, the above described way of determination of PF may not be used when determining the amount of PF for normal resistance $\gamma_{R,v}$. The reason for this is that design of bearing capacity according to "Rulebook on Technical Standards for Building Foundations" uses equation with partial (not global) factors, and where angle of friction is present in different parts of equation. Those were the reasons to perform the design in appropriate software for designing of retaining structures. Some of commercial software packages (like GEO5) already have an option for calculation according to eurocodes. This software also allows designing according to other standards and customization for particular user needs and demands. These advantages are used in following analysis. Within the most common ranges of PSR for the ground ($\varphi=15-25-35^\circ$, $c=0-10-20-30$ kPa), two types of retaining walls were considered: concrete gravity wall and cantilever reinforced wall. Their height was assumed as 4m, and they were analysed for conditions without and with surcharge of $q=20$ kN/m². Section dimensions were determined after meeting conditions for minimal global factors of safety for overturning, sliding and bearing capacity, whose values were set according to actual standards (1.50); the bearing capacity of foundation was determined according to "Rulebook". Stability of such designed structures was tested according to DA2*, with calculation required for PF for horizontal resistance $\gamma_{R,h}$ (for testing of sliding stability) with value of 1.10 and with proposed PF in EC7 for testing bearing capacity, i.e., reduction of vertical resistance by 1.40. This kind of

ovakav način, odnosno kontrolom usvojenih dimenzija prema novom postupku, dobijane su „rezerve“ sigurnosti. Izvodi iz proračuna i rezultati prikazani su na slikama 1–2 i u tabelama 4–7, pri čemu su:

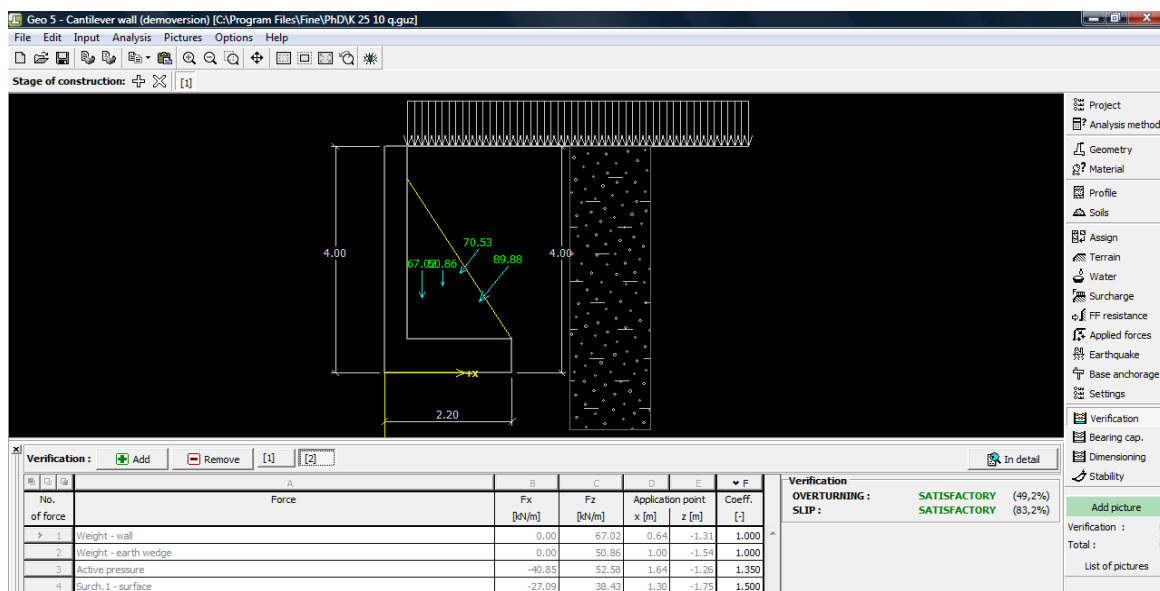
- u vertikali sa FS_{kl} zapisane vrednosti obezbeđenih koeficijenata sigurnosti na klizanje prema dosadašnjem postupku, gde minimalni koeficijent iznosi 1,50;
- u vertikali označenoj sa FS_{nos} unošeni postignuti rezultati iz ispunjenja uslova o nosivosti, pri čemu je sadašnji zahtev za $R_v=1,40$;
- u zadnjoj vertikali R_h zapisane obezbeđene vrednosti u novim uslovima za proračun stabilnosti na klizanje (min 1,10).

checking of adopted dimensions according to the new approach gained "extra" safety. Parts of the design and results are given in Figures 1-2 and Tables 4-7, where:

- in the vertical marked with FS_{kl} are specified values of gained factors of safety for sliding according to actual approach, with minimal factor of 1.50;
- in the vertical marked with FS_{HOC} are entered results gained from meeting the condition of bearing capacity, with actual requirement $R_v=1,40$;
- in the last vertical R_h are entered gained values in new conditions for designing the sliding (min 1.10).



Slika 1. Izgled dela modula programa GEO5 za proračun gravitacionih zidova
 Figure 1. View on user interface of GEO5 module on designing gravity walls



Slika 2. Izgled dela modula programa GEO5 za proračun konzolnih zidova
 Figure 2. View on user interface of GEO5 module on designing cantilever walls

Tabela 4. Rezultati iz analize gravitacionog betonskog zida
Table 4. Results from analysis of gravity wall

□	c=0			c=10 kPa			c=20 kPa			c=30 kPa		
	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10
15	1,91	1,53	1,43	1,62	1,54	1,19	1,82	1,54	1,26	>>1,50	2,44	>>1,10
25	1,54	1,67	1,17	1,92	1,65	1,42	7,38	4	5,5	>>1,50	3,62	>>1,10
35	2,07	2,24	1,61	3,36	4,05	2,51	13,05	5,48	13,05	/	/	/

Tabela 5. Rezultati iz analize gravitacionog zida sa opterećenjem q=20 kN/m²
Table 5. Results from analysis of gravity wall with surcharge q=20 kN/m²

□	c=0			c=10 kPa			c=20 kPa			c=30 kPa		
	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10
15	1,5	1,54	1,13	1,55	1,79	1,1	1,72	1,9	1,14	2,5	1,92	1,66
25	1,52	1,72	1,12	1,65	1,52	1,17	2,6	1,83	1,79	>>1,50	1,61	>>1,50
35	1,79	2,42	1,37	2,8	4,34	2,02	4,79	3,99	3,56	/	/	/

Tabela 6. Rezultati iz analize armiranobetonskog konzolnog zida
Table 6. Results from analysis of cantilever wall

□	c=0			c=10 kPa			c=20 kPa			c=30 kPa		
	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10
15	1,52	1,56	1,19	1,53	2,32	1,21	1,55	2,93	1,21	2,01	2,58	1,51
25	1,58	1,52	1,32	1,66	1,52	1,37	2,3	2,12	1,83	3,9	2,97	2,97
35	2,25	1,6	1,92	2,96	2,08	2,44	4,76	2,48	3,81	/	/	/

Tabela 7. Rezultati iz analize konzolnog zida sa opterećenjem q=20 kN/m²
Table 7. Results from analysis of cantilever wall with surcharge q=20 kN/m²

□	c=0			c=10 kPa			c=20 kPa			c=30 kPa		
	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10	F _{S_{кп}}	F _{S_{НОС}} , Rv=1,40	Rh=1,10
15	1,52	1,54	1,19	1,52	2,24	1,2	1,54	2,24	1,22	1,56	2,9	1,22
25	1,64	1,53	1,35	1,62	1,53	1,32	1,78	1,52	1,43	2,58	2,07	1,99
35	2,08	1,72	1,81	2,5	1,71	2,14	3,2	1,82	2,68	/	/	/

Iako su proračuni vršeni s minimalnim predloženim koeficijentima, čini se da su pojedini zidovi predimenzionirani. Međutim, mora se istaći to da su njihove dimenzije ipak minimalne i da ispunjavaju i preostale kriterijume, od kojih neki nisu dati ovde jer nisu značajni za istraživanje: ekscentricitet rezultantne sile, uslov stabilnosti na prevrtanje i slično. Iz prikazanih rezultata vidi se da nema nikakvih ugrožavanja i odstupanja u

Although the calculations were performed with minimal proposed factors, it seems that some walls are over designed. Yet, it should be emphasised that those are minimal dimensions that also meet other requirements (some of them are not shown here as they are not relevant for the investigation), such as eccentricity of resultant force, condition for overturning stability etc. Results suggest that there are no risks and

stabilnosti zidova dimenzioniranih prema tradicionalnim pristupima, a kontrolisanim prema novim koeficijentima preporučenim u EK 7. Imajući to u vidu, kao i dosadašnje bogato pozitivno iskustvo, predlaže se da se u NA za R_v i R_h usvoje PK u iznosu od 1,10 i 1,40, što je identično izvorno predloženim u Aneksu A EK 7-1, a kojima se zadržavaju postojeća sigurnost i stabilnost potpornih zidova.

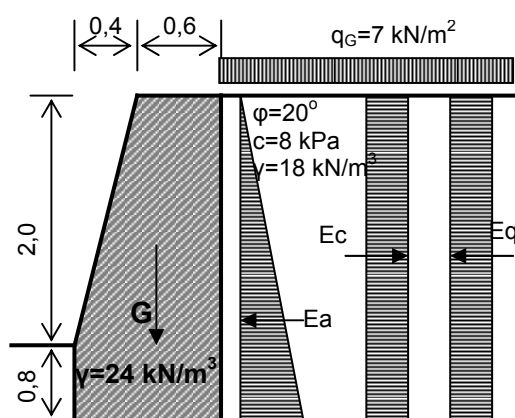
5 ZNAČENJE PRAVILNOG IZBORA PP I PK

U produžetku je dat jednostavan proračunski primer na kom se može videti značaj pravilnog izbora odgovarajućeg PP i PK, gde je na slici 3 prikazan potporni zid sa opterećenjem, za koji je potrebno proveriti sigurnost na klizanje prema aktuelnim propisima (globalni faktori sigurnosti) i uporediti je s proračunima prema EC7 (parcijalni koeficijenti sigurnosti). Rezultati su dati u tabeli 8.

deviations in stability of the walls designed with traditional approaches and controlled using new factors recommended under EC7. This fact and actual positive practice suggest adoption of PF of 1.10 and 1.40 in NA for R_v and R_h , which is equal to originally proposed values in Annex A of EC 7-1 and which ensures safety and stability of retaining walls.

5 IMPORTANCE OF SELECTING APPROPRIATE DA AND PF

Below is a simple example of design for illustration of importance of selecting appropriate DA and PF. Figure 3 shows surcharged retaining wall. The task is to check sliding safety according to actual regulation (global factors of safety) and compare it with designs according to EC7 (partial factors of safety). Results are given in Table 8.



Slika 3. Skica analiziranog potpornog zida
Figure 3. Sketch view of analyzed retaining wall

Tabela 8. Tabelarni prikaz rezultata iz analize potpornog zida sa različitim PP
Table 8. Tabular view of results from analysis of retaining wall with different DA

Parametar Parameter	Dosadašnji proračun Actual calculation	PP2*	PP3
G [kN/m ³ /m]	57.6	57.6	57.6
ϕ_d [°]	20	20	$a \tan\left(\frac{\tan 20^\circ}{1,25}\right) = 16^\circ 14'$
c_d [kPa]	8	8	$\frac{c}{\gamma_c} = \frac{8}{1,25} = 6,4 \text{ kPa}$
γ [kN/m ³]	18	18	18
$k_a = \tan^2(45 - \phi_d / 2)$	0.49	0.49	0.563
$E_a = \frac{1}{2} k_a \gamma H^2$	34.6	34.6	39.73
$E_c = 2c_d \sqrt{k_a} H$	31.4	31.4	26.89
$E_q = q k_a H$	9.6	9.6	11.03

$R_{V,d} = \frac{\gamma_{G,fav} \cdot G \cdot \tan \delta}{\gamma_{Rh}}$	$\frac{1.0 \cdot 57.6 \cdot \tan 20^\circ}{1.0} = 20.96$	$\frac{1.0 \cdot 57.6 \cdot \tan 20^\circ}{1.1} = 19.06$	$\frac{1.0 \cdot 57.6 \cdot \tan 16^\circ 14'}{1.0} = 16.77$
$R_{H,d} = \gamma_{G,unfav} \cdot (E_a - E_c + E_q)$	$1.0 \cdot (34.6 - 31.4 + 9.6) = 12.8$	$1.35 \cdot (34.6 - 31.4 + 9.6) = 17.28$	$1.00 \cdot (39.73 - 26.89 + 11.03) = 23.87$
$R_{V,d} / R_{H,d}$	1.64	1.10	0.703
$(R_{V,d} / R_{H,d})_{\min}$	1.5	1.0	1.0
Ocena Result	OK	OK	???

S obzirom na to što se prema dosadašnjim propisima i PP2* dobijaju slični rezultati, odnosno što im se dimenzije i stabilnost potpornog zida podudaraju, može se još jednom potvrditi da su PP2* i predloženi PK odgovarajući za primenu uopšte u regionu ranije SFRJ. Nasuprot tome, rezultati prema PP3 drastično odstupaju, a dodatne kalkulacije pokazale su da je, uz zadržavanje ostalih dimenzija, potrebna širina krune zida od $b=1.0$ m da bi zid bio stabilan. U kredibilitet i tačnost ovih proračuna zida posumnjače, nezavisno, i projektant i izvođač na osnovu njihovih dosadašnjih iskustava, iz čega se lako uočava važnost pravilnog izbora PP i PK. Sa ovakvim neprijatnim situacijama već su počele da se suočavaju kolege iz Hrvatske gde je PP3 izabran za proračun zidova.

6 IZJAŠNJAVANJE O ANEKSU S I KOMENTARI O KOEFICIJENTIMA

U dodatku Evrokoda 7-1 nalazi se nekoliko aneksa, od kojih je Aneks A obavezan i u njega se unose ili zadržavaju vrednosti PK. U NA, zemlje iznose svoj stav o njima, a tako je i sa Aneksom C, gde su dati predlozi za određivanje koeficijenata aktivnih i pasivnih zemljanih pritisaka i to putem gotovih dijagrama i preko numeričkog postupka. Međutim, time je učinjen korak nazad za analize, jer je navedena faza nepotrebno iskomplikovana, a naročito za naš region gde nemaju tradiciju primene. Naime, u vreme visoke tehnologije, korišćenje grafičkih dijagrama je deplasirano. Taj postupak svakako treba izbegavati, jer je složen, ograničen i ne pruža mogućnost tačnog određivanja koeficijenata. Dalje, na dijagramima su date zavisnosti za nekoliko slučajeva, dok se za ostale, a sasvim izvesne opšte uslove, treba raditi interpolacija, čija je ispravnost ponovo diskutabilna. Navedene nedostatke ispravlja drugi ponuđeni postupak koji se zasniva na linijama loma u tlu, ali je njegova praktična primena otežana jer se primenjuju parametri koji su veoma strani inženjerima. Ipak, i prilikom njene primene treba biti pažljiv, jer se za pojedine članove napominje da su „na strani sigurnosti”, što se uobičajeno tumači dobijanjem nešto većih koeficijenata. Međutim, ukoliko se tako proračunaju zemljani pritisci, veoma je važno, ali ponekad i neostvarljivo, da oni budu nepovoljni [19]. U suprotnom, pri njihovom nanošenju na sile koje povoljno deluju na

Having in mind that actual regulations and DA2* gain similar results, i.e., that dimensions and stability of retaining wall coincide, we can assert that DA2* and proposed PF are appropriate for general application in the region of former Yugoslavia. Unlike that, the results under DA3 deviate in great extent, and additional calculations have shown that wall crest (while maintaining other dimensions) should be $b=1.0$ m to maintain wall stability. Based on their own experience, both designer and contractor would (independently) question the credibility and accuracy of these designs, which makes the importance of selection of appropriate DA and PF so evident. Engineers in Croatia already have negative experience with DA3 as approach selected for designing walls.

6 RESPONDS TO ANNEX C AND COMMENTS ON FACTORS

Eurocode 7-1 includes several annexes. Annex A is mandatory and it serves to input or retain values of partial factor. Single countries in their own National annexes express their opinion; Annex C, for example, offers propositions for determination of coefficients of active and passive earth pressures (via diagrams and numeric operation). However, it posed a "set-back" for analysis, because the mentioned stage was made too complicated, especially for our region with no tradition in application. Namely, graphic diagrams seem outdated in hi tech era; moreover, this approach should be avoided as too complex and limited and it does not ensure exact determination of factors. Additionally, graphs indicate dependencies only for few cases, so it is necessary to perform interpolation for other general conditions, which makes resulting correctness disputable. Fore mentioned shortcomings may be avoided with other approach offered, based on lines of failure in the ground, but its application is difficult due to usage of factors that seem quite unfamiliar to engineers. However, it should be employed with a great caution, because particular elements are assumed as "on safe side", which is commonly interpreted with gaining a bit greater coefficients. Yet, if such approaches are used to calculate earth pressures, it is very important (although sometimes impossible) for them to be unfavourable [19]. On the contrary, their applying on the forces that

konstrukciju, onemogućava se njeno korektno dimenzioniranje. S druge strane, ukoliko se ova dva postupka međusobno uporede, identični rezultati će se postići samo u slučaju kada ne postoji trenje između tla i zida [19], što je idealizovan slučaj, a razlika će bivati izraženija što je veći ugao trenja tla.

Imajući u vidu navedeno, budućim korisnicima se može ostaviti mogućnost njihove primene, ali ipak koncentraciju treba usmeriti ka postojećem postupku – Kulombovom metodu. Njegovu viševjekovnu uspešnu primenu ne samo kod nas, već i u svetu, treba isticati kao jak argumenat za zadržavanje. Uspešna primena duguje se neograničenosti i nesputanosti jer obuhvata sve uticaje na intenzitet koeficijenata zemljanih pritisaka. Uostalom, predloženi dijagrami u informativnom Aneksu S za očitavanja koeficijenata veoma su slični sa izlazima iz jednačine po Kulombu. Ipak, bez obzira na to da li se primenjuje Kulombov pristup ili predlog u Aneksu S, ostaje nemogućnost da se koeficijent zemljanog pritiska proračuna u uslovima kada je naklon terena veći od ugla trenja. U takvim slučajevima, ali ne i samo tada, u Kulombovoj jednačini može se primeniti opis smičuće otpornosti nelinearnom anvelopom loma hiperboličnog tipa. Njome se smičuća otpornost izražava samo preko ugla, koji nije konstantan [10], i menja vrednosti u dijapazonu do onog koji je po iznosu u rang u ugla unutrašnjeg trenja, a može da počinje od više od njegovog dvojnog iznosa. S obzirom na to što se u PP 2* ne vrši redukcija PSO, njihove karakteristične vrednosti su ujedno i proračunske. Nelinearna anvelopa je poželjna i zato što se kod tla bez kohezije, kao što se može videti iz gornjih tabela, postiže veća bliskost postignutih koeficijenata sigurnosti s ciljanim.

Vrednost i način proračuna koeficijenata zemljanih pritisaka jesu važni, jer je za određene potpome konstrukcije ustanovljeno da način njihovog proračuna utiče na rezultate, a razlika može biti u domenu razlika koje se javljaju između različitih PP [18]. Osim njihovog proračuna, diskutabilna je i vrsta primenjenih koeficijenata. Naime, ukoliko se dimenzioniše objekat visokog značaja ili se analiziraju dugotrajni uslovi, onda je neophodno da se zemljani pritisci proračunavaju kao u stanju mirovanja, jer aktivni i pasivni zemljani pritisci su krajnji, minimalni i maksimalni, a povoljni i poželjni slučajevi pritisaka. Uz to, oni su i vremenski nestabilni, što ne znači da će se pojaviti na takav način i u tom intenzitetu usled, na primer, prisustva ankera, podupirača i sličnih konstruktivnih elemenata koji ograničavaju pomeranja [7]. Povećanje pomeranja utiče na smanjenje zemljanih pritisaka, ali dok se ne postignu ta pomeranja, kao i da bi se ona postigla, prethodno će konstrukcija primiti one u stanju mirovanja. Ovo je realan, nepovoljan i najverovatnije kritičan slučaj opterećenja. Još više, može se očekivati da će se pomeranja zida smanjivati tokom vremena, pa će pritisci imati tendenciju da postignu vrednosti u stanju mirovanja. U obratnom slučaju, ukoliko pomeranja rastu, smičuća otpornost može dostići rezidualne vrednosti.

Na neke od ovih dilema ukazivano je i ranije s ciljem poboljšanja predloga, ali do sada nisu ozbiljnije tretirane. Određene sugestije su još uvek otvorene, poput (ne)pravilnosti usvajanja konstantnih vrednosti koeficijenata zemljanih pritisaka po celoj visini, potrebe razmatranja intervala zemljanog pritiska u mirovanju, a ne samo jedinačne vrednosti, čime bi se uvideo domen

favourably affect the structure prevents correct designing. But, when these two approaches are compared, identical results will be gained only if there is no friction between ground and the wall (which is ideal case) [19] and the difference is getting higher as the values of friction angle of the ground are increasing.

Having in mind all above mentioned, new users are free to decide on application, although it is recommended to focus on the Coulomb's method. Its long lasting world-wide application is strong argument. This method has no limitations or constraints, because it includes all effects on intensity of coefficient of earth pressures. Moreover, diagrams proposed in informative Annex C are very similar to outputs from the equation according to Coulomb. But, whether Coulomb approach or suggestion in Annex C is used, there still is impossible to calculate the coefficient of earth pressure if the ground slope is higher than the angle of friction. In such case (but not restricted to that particular instance), the Coulomb equation allows description of shearing resistance by non linear failure envelope of hyperbolic type. Thus, shearing resistance is expressed only by angle that is unbalanced [10] but changes its values up to the value of the angle of internal friction, while it can start from the twice higher amount than that. Knowing that the PSR is not reduced in DA2*, their characteristic values are also design values. Non linear envelope is favourable because the ground free of cohesion (as can be seen in tables) gains greater similarity of factors of safety with targeted ones.

Values and method of calculation of coefficients of earth pressures are important because it is found that the method of calculation for some retaining structures affects the results, and that difference may derive from differences between various DA [18]. Besides the design, the type of applied coefficients is also a dispute. Namely, when designing a structure of great importance, or when analyzing long lasting conditions, it is necessary to calculate at-rest earth pressures, because active and passive earth pressures are limit, minimal and maximal states, and favourable ones. Besides that, they are time-dependable, i.e., they will not occur in exactly the same manner and intensity when anchors, shores or similar structure elements for limitation of displacement are present [7]. Increase in displacement affects the decrease of earth pressures, but before those displacements are achieved (as well as in order to achieve them) the structure will receive those at at-rest state. This is real, unfavourable and probably critical case of loading. Besides that, it may be expected that wall displacements will decrease with time, so the pressures will tend to reach at-rest values. Otherwise, increase in displacements may cause shear resistance to reach residual values.

Some of these arguments have already been suggested as a means for improving of proposition, but they have not been treated in detail thus far. Some suggestions are still open, like (i) regular adoption of constant values for earth pressure factors along entire height and the need to consider the interval of at-rest earth pressure, and not only as a single value, which allows insight into the domain of values of structure dimensions, and possible decrease of peak shear strength to its residual value [9]. Same are the reasons to suggest that temporary structures or sheet pile walls

vrednosti dimenzija konstrukcije, kao i mogućeg opadanja vršne smičuće čvrstoće ka rezidualnoj vrednosti [9]. Zbog sličnih razloga, može se predložiti da se privremene konstrukcije ili podgrade, zbog očekivanih pomeranja, dimenzioniraju prema graničnim stanjima aktivnog i pasivnog pritiska, dok bi se trajne konstrukcije proračunavale prema zemljanom pritisku u mirovanju [7]. Ovo je donekle ponuđeno i Evrokodom 7-1, tačkom 9.5.4, gde se ostavlja mogućnost da se proračun zida koji se ne može dovoljno pomeriti, kako bi se mobilisale granične vrednosti zemljanih pritisaka, vrši prema srednjim vrednostima između graničnih i u mirovanju.

Sporna je i kohezija. Iako je standardna praksa ravnopravno tretira sa uglom trenja, pojedinim istraživanjima pokazano je da njen navodni uticaj opada s povećanjem dubine, odnosno visine zida, pa ono što se uzima u proračunu odgovara samo zidovima s malom i srednjom visinom [8]. Kako bi se izbegle ove opasnosti, poželjno je primenljivati nelinearan opis smičuće otpornosti, što po definiciji isključuje koheziju, a tretira samo promenljiv ugao trenja. U okviru ovih malih i srednjih visina, javljaju se mali normalni naponi (i eventualno negativni porni pritisci ukoliko tlo nije zasićeno). U ovoj zoni je ugao smičuće otpornosti najviši, što odgovara i smanjenom zemljanom pritisku koji se najčešće tumači prisustvom kohezije. Poznato je da s povećanjem napona dolazi do sniženja ugla, što se neopravdano pripisuje smanjenom uticaju kohezije. Navedeno je u smeru ravnopravnog tretiranja svih konstrukcija, bez obzira na visinu ili vrste tla, a zahvaljujući prihvatanju nelinearne anvelope loma hiperboličnog tipa koja usled različitih normalnih napona po visini konstrukcije definiše različite uglove odakle proizlaze različiti koeficijenti zemljanih pritisaka.

Iz aspekta primene MKE, treba istaći da na intenzitet zemljanih pritisaka u numeričkim analizama utiče i veličina pomeranja zida [5], pa se aktivno i pasivno stanje, praktično, ne može uvek postići. To isto važi i za pomeranja zida prema predlozima datim u Aneksu S, odakle i proizlazi nešto manja pouzdanost vrednosti zemljanih pritisaka prilikom proračuna s MKE.

7 ZAKLJUČAK

Za proračun potpornih zidova do sada je korišćen postupak koji zahteva zadovoljavanje nekoliko globalnih faktora sigurnosti. Isti postupak primenljiv je i u evropskim zemljama, pa se najveći deo njih, kako je napomenuto, odlučio da se za proračun prema EK 7 usvoji PP2*. Razlog za to je sličnost dosadašnjem stilu proračuna, a nakon provera dimenzioniranja, usvojeni su akcioni i PK za otpor koji su izvorno predloženi u Aneksu A, čime se daje i prilog budućoj harmonizaciji. Zbog određenih ograničenja numeričke primene PP2*, predlaže se da se prilikom eventualne analize s MKE koristi PP 3.

U NA, iznose se i stavovi o ponuđenim aneksima, među kojima je i Aneks C koji je zanimljiv iz aspekta potpornih zidova, jer iznosi predloge o koeficijentima aktivnih i pasivnih zemljanih pritisaka. Imajući u vidu ranije navedeno, predlaže se zadržavanje aktuelnog Kulombovog metoda koji omogućava i primenu nelinearne anvelope loma hiperboličnog tipa, a koja, opet, nudi brojne prednosti.

Ovakve komparativne studije, prilikom izrade NA,

should be designed according to limit states of active and passive pressure, while permanent structures would be designed after at-rest earth pressure [7]. This is somewhat also offered within Eurocode 7-1 (9.5.4), with a possibility for the walls that may not be displaced enough (to mobilize limit values of earth pressures) to be designed according to the mean values between limit values and at-rest values.

Cohesion is disputable, too. Although the standard practice considers it equally as the angle of friction, some research have shown that the supposed impact of cohesion decreases along with increase of depth, i.e., height of the wall, so the values adopted in design relate only to walls of small or medium height [8]. To avoid such risks, it is recommended to employ non linear description of shear resistance, which, by definition, excludes cohesion and considers only changeable angle of shearing resistance. Within these small or medium heights only small normal stresses occur (and possible negative pore pressures, if the ground is not saturated). This zone is characterised with highest angle of shearing resistance, resulting with decreased active earth pressure which is unduly correlated to cohesion. It is well known that the increase in stress results in decrease of angle, even though it is sometimes considered as an effect of decreased impact of cohesion. Above mentioned is aimed at equal consideration of all structures, without any special regards to the height of wall or type of the ground, due to adoption of non linear failure envelope of hyperbolic type which (because of different normal stresses along height of the structure) serves to define different angles from which different coefficients of earth pressures derive.

Concerning the application of FEM, it should be emphasised that intensity of earth pressures in numeric analyses is also affected by the amount of wall displacement [5], so the active and passive states cannot always be achieved. The same is with wall displacement according to suggestions in Annex C, which results with somehow smaller reliability of earth pressures while designing with FEM.

7 CONCLUSIONS

Until now, the design of retaining walls has used approach that requires meeting of several global factors of safety. This approach was also used in European countries, so most of them have decided to employ DA2* as an approach to be used under EC7. This decision is caused by similarities with actual designing style. After evaluation of designing, action PF and PF for resistance were adopted (originally suggested in Annex A), thus contributing the future harmonization. Due to particular limitations of numerical application of DA2*, application of DA3 is suggested when performing analysis with FEM.

National annexes also contain opinions about suggested annexes, including Annex C which is interesting from the aspect of retaining walls, because it makes suggestions about coefficients of active and passive earth pressures. Having in mind above mentioned, it is suggested to maintain the actual Coulomb method that also allows application of non linear failure envelope of hyperbolic type, because of its many advantages.

trebalo bi realizovati za sve geotehničke konstrukcije u Evrokodu 7-1. Dosadašnje aktivnosti na tom polju ukazale su i na određene konstrukcije gde je utvrđivanje iznosa PK mnogo komplikovanije nego ovo koje je u ovom radu izneto, na šta treba posebno obratiti pažnju.

During the preparation of NA, such comparative studies should be performed for all geotechnical structures within Eurocode 7-1. Past activities in that field have indicated that determination of PF for some structures is much more complex than it is presented here, so special attention should be paid on this issue.

8 LITERATURA REFERENCES

- [1] Becker P., Gebreselassie B., Kempfert H.-G.: „Comparison of different limit state design approaches of retaining structures“, pp.219-224
- [2] „Evrokod 0, Osnove proračuna konstrukcija“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2006, 79p
- [3] „Evrokod 1, Dejstva na konstrukcije, Deo1-1: Zapreminske težine, sopstvena težina, korisna opterećenja za zgrade“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2009, 43p
- [4] „Evrokod 7, Geotehnički proračun, Deo 1: Opšta pravila“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2009, 163p
- [5] Folić R., Memić M., Ibrahimović A.: „Komparativna analiza metoda za procenu pomeranja fleksibilnih sidrenih betonskih dijafragmi“, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol.56, Br.2, 2013, str.19-43
- [6] Heibaum M., Herten M.: „Finite element method (FEM) for verifications in geotechnical design“, Proceedings of the 17th ICSMGE, Alexandria, 2009, pp.1662-1665
- [7] Koudelka P.: „More Advanced Theoretical Concept of Earth Pressure for EC7-1 and ČSN 73 0037 – preliminary draft“, International Scientific Conference, Ostrava, 2005, 8p.
- [8] Koudelka P.: „Prospects of design analyses in geotechnics“, Proceedings of the 14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Bratislava, 2010
- [9] Koudelka P., Koudelka T.: „Risk involved in conventional numerical models of lateral pressure on structures“, 2003, 6p.
- [10] Maksimović M.: „Mehanika tla“, AGM knjiga, Beograd, 2008, 643str.
- [11] Memić M., Folić R., Ibrahimović A.: „Metode numeričkog modeliranja i sanacije nestabilne padine u izmenjenoj serpentinskoj stenskoj masi“, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol.55, Br.4, 2012, str.23-45
- [12] Nonveiller E.: „Mehanika tla i temeljenje građevina“, Školska knjiga, Zagreb, 1979,
- [13] Orr T.: „Experiences with the application of Eurocode 7: Reports on experiences in Austria, Sweden and Ireland“, ERTC 10 and SC7 Workshop at XV ECSMGE, Athens, 2011
- [14] Papić J. Br., Prolović V., Dimitrievski Lj.: „Predlog za proračun potpornih zidova u regionu prema Evrokodu 7“, 5. naučno-stručno savetovanje „Geotehnički aspekti građevinarstva“, Soko Banja, 2013, str.75-82
- [15] Scarpelli G., Fruzzetti V.M.E.: „Evaluation of Eurocode 7 – Spread foundations design“, Proceedings of the International Workshop on the Evaluation of EC 7, 2005, pp.109-116
- [16] Schreiner H.D., Meiring J.: „The effect of global and partial factors of safety in bearing capacity calculations“, Jour. of South African inst. of Civil Engineers, 43 (1), 2001, pp.19-23
- [17] Schweiger H.F.: „Application of FEM to ULS design (Eurocodes) in surface and near surface geotechnical structures“, Proc. 11th Int.Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Bologna, 2005, Vol.4, pp.419-430
- [18] Simpson B.: „Approaches to ULS design – The merits of Design Approach 1 in Eurocode 7“, IS on EC7 and geotechnical aspects of EC8, MAG-ISSMGE, Struga, 2008, pp.125-136
- [19] UK National Annex to Eurocode 7: Geotechnical design, 2007
- [20] Vogt N., Schuppener B., Weissenbach A.: „Implementation of Eurocode 7-1 in Germany – selection of design approach and values of partial factors“, 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Gdansk, 2008

REZIME

PRILOG IZRADI NACIONALNOG ANEKSA EVROKODU 7 – IZ ASPEKTA POTPORNIH ZIDOVA

Jovan B. PAPIĆ
Verka PROLOVIĆ
Ljupčo DIMITRIJEVSKI
Dragan LUKIĆ
Zoran BONIĆ

Za razliku od ostalih evrokodova, gde je dimenzioniranje konstrukcija prilično jasno, u Evrokodu 7 ponuđena su tri različita postupka za proračun, kao i kompleti parcijalnih koeficijenata koje treba primeniti u njima. Nakon prihvatanja Evrokoda 7, u okviru pripreme Nacionalnog aneksa, svaka zemlja treba da donese još dve veoma važne odluke o izboru proračunskog postupka prema kome bi se vršilo dimenzioniranje geotehničkih konstrukcija, i definisanju njemu odgovarajućih parcijalnih koeficijenata. Prilikom određivanja odgovarajućeg proračunskog postupka, potrebno je da se određeni geotehnički problem uporedno analizira s postojećim i s predloženim metodama, tokom čega će se ustanoviti koji je postupak najbliži dosadašnjem „stilu” proračuna. Kompatibilnost „starog” i novog metoda proračuna omogućuje da se odabere odgovarajući proračunski postupak, a dalje i da se dobiju približno iste dimenzije konstrukcija, jer će sličnost projekata dati predlog o iznosu parcijalnih koeficijenata. U ovom radu prikazane su analize i verifikacije urađene za potrebe takvih odluka za potporne zidove, koje su dovele do izbora koji se može primenjivati i u regionu.

Ključne reči: Evrokod 7, proračunski postupak, parcijalni koeficijenti, potporni zidovi

SUMMARY

TOWARDS PREPARATION OF NATIONAL ANNEX TO EUROCODE 7 - FROM ASPECT OF RETAINING WALLS MIHA TOMAŽEVIĆ

Jovan B. PAPIĆ
Verka PROLOVIĆ
Ljupčo DIMITRIJEVSKI
Dragan LUKIĆ
Zoran BONIĆ

Unlike the other eurocodes where structure designing is fairly clear, there are three design approaches offered in Eurocode 7 and sets of applied partial factors. After accepting Eurocode 7, each country has to decide on two very important decisions related to the selection of appropriate design approach according to which designing of geotechnical structures is going to be performed and define adequate partial factors. Selection of appropriate design approach is based on analyses of certain geotechnical problem both with actual and proposed methods. Therefore, it should be found out which approach is the closest to hitherto calculation “style”, which compatibility of “old” and new method will serve as a base for selecting appropriate design approach. Moreover, it will be tested with different partial factors in order to obtain approximately the same size of structural elements or construction, which similarity will suggest the value of partial factors. Analyses and verifications are performed for such purposes for retaining walls, which conclusions, presented below, lead to solution that can be used in the region.

Key words: Eurocode 7, design approach, partial factors, retaining walls

TIPOLOGIJA NSPA *PUSHOVER* KRIVIH I POVRŠI ZA 3D SEIZMIČKI ODGOVOR KONSTRUKCIJA PREMA PERFORMANSAMA

TYOLOGY OF NSPA *PUSHOVER* CURVES AND SURFACES FOR 3D PERFORMANCE-BASED SEISMIC RESPONSE OF STRUCTURES

Mladen ČOSIĆ
Stanko BRČIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER
UDK: 624.041.7
ID: 204280332

1 UVOD

Metodologija analize konstrukcija za uslove dejstva zemljotresa, kada su u pitanju praktični inženjerski problem, bazira se na primeni spektralno-modalne analize ili ekvivalentne statičke metode, dok se znatno manje primenjuje dinamička analiza [15]. Pored postojećih metoda, razvijene su i unapređuju se nove metode koje se baziraju na nelinearnom ponašanju konstrukcija u uslovima dejstva zemljotresa [16]. Integracija novih metoda sprovedena je u metodologiji analize konstrukcija prema seizmičkim performansama (PBEE – *Performance-Based Earthquake Engineering*), a koja se sprovodi za jednu komponentu ili veći broj komponenti seizmičkog dejstva, kao što su dve horizontalne i jedna vertikalna. Kada se primenjuje jedna komponenta seizmičkog dejstva, tada su numerički modeli konstrukcija 2D ravanski, 3D prostorni ili dekomponovani 3D modeli, a ukoliko se primenjuju dve ili tri komponente seizmičkog dejstva, tada su numerički modeli konstrukcija 3D prostorni modeli. Seizmički odgovor konstrukcija prema performansama u nelinearnom domenu moguće je prezentovati primenom *pushover* krivih za slučaj razmatranja jedne ili dve komponente seizmičkog dejstva. Primena *pushover* krivih kod 2D modela konstrukcija predstavlja standard za prezentaciju odgovora sistema u kapacitativnom domenu. U svim dosadašnjim istraživanjima nelinearnog ponašanja 3D modela konstrukcija u uslovima dejstva zemljotresa, prikazivanje odgovora sistema, u kapacitativnom domenu, sprovedeno

Mr Mladen Čosić dipl. inž. građ., doktorand, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, lična adresa: Marka Milanovića 17, 15300 Loznica, mladen.cosic@ymail.com
Prof. dr Stanko Brčić dipl. inž. građ., Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, stanko@grf.bg.ac.rs

1 INTRODUCTION

Methodology of the earthquake structural analysis, used in the everyday and routine engineering work, is based upon the multimodal spectral analysis or the equivalent static analysis, while the full dynamic earthquake analysis is applied in a smaller amount [15]. Besides these existing methods, various new ones are being developed and improved, based upon the nonlinear behaviour of structures when exposed to earthquake actions [16]. Integration of new methods has been achieved in the methodology of structural analysis according to seismic performance (PBEE - Performance-Based Earthquake Engineering), which is conducted for one or more components of the seismic action, such as the two horizontal and one vertical. When one component of the seismic action is applied, then the numerical models of structures are 2D planar, 3D spatial or decomposed 3D models, and if two or three components of the seismic action are applied, then the numerical models of structures are 3D spatial models. Performance-based seismic response of the structure in the nonlinear domain may be presented by a pushover curve when taking into consideration one or two components of the seismic action. The application of the pushover curves in 2D models of structures represents a standard for the presentation of the system response in the capacity domain. In all previous studies of the nonlinear behaviour of the 3D structural models during the earthquake, the presentation of system response, within

Mladen Čosić, M.Sc., doctoral student, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, personal address: Marka Milanovića 17, 15300 Loznica, Serbia, mladen.cosic@ymail.com
Prof. dr Stanko Brčić, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Boulevard of King Alexander 73, 11000 Belgrade, Serbia, stanko@grf.bg.ac.rs

je analogno, kao i kod 2D modela – preko *pushover* krivih. Dodatno su kod 3D modela konstrukcija razmatrani i inkorporirani u analizu efekti bidirekcionog dejstva zemljotresa, torzije, neregularnosti u osnovi i po visini konstrukcije. U radovima [14] i [19] sprovedene su numeričke analize odgovora 3D modela zgrada, s tim što je odgovor sistema u kapacitativnom domenu razmatran za dva ortogonalna pravca i po dva smera za svaki pravac, kao što je prikazano i u [11], [12] i [13]. U radovima [21], [22] i [23] prikazana je modalna *pushover* analiza bazirana na proračunu skaliranjem dvokomponentalnih akceleroograma 3D modela zgrada, a kao odgovor prikazane su *pushover* krive za dva ortogonalna pravca. *Pushover* kriva dobija se iz NSPA analize koja se bazira na inkrementalno-iterativnoj proceduri, pri čemu se prati odgovor sistema sve do kolapsa [26], [27].

Seizmički odgovor konstrukcija prema performansama u nelinearnom domenu moguće je prikazati i primenom *pushover* površi za slučaj razmatranja dve komponente seizmičkog dejstva. Konstrukcija i generisanje *pushover* površi sprovodi se integracijom nelinearnih odgovora datih preko individualnih *pushover* krivih za različite uglove i za multikomponentalno dejstvo zemljotresa [4]. Prethodno je potrebno generisati multikomponentalne akceleroograme i spektre odgovora za različite uglove u odnosu na komponentu upravno na pravac pružanja raseda (*fault normal*) i komponentu paralelno pravcu pružanja raseda (*fault parallel*) [24], [25]. Pošto je primena *pushover* površi u prezentaciji i razmatranju performansi konstrukcija još u inicijalnoj fazi, otvorena su brojna pitanja, kao što su: detaljnija matematička formulacija, tipologija, aspekti primene na realnim modelima konstrukcija, specijalni slučajevi *pushover* površi, prednosti i nedostaci u prikazivanju performansi primenom *pushover* površi, itd. Predmet istraživanja u ovom radu jeste matematička formulacija i tipologija *pushover* krivih i površi za opšte modele konstrukcija zgrada. Sistematizacija tipova *pushover* krivih i površi izvršena je na osnovu obimnih iskustava autora na većem broju seizmičkih analiza numeričkih modela konstrukcija. Primenom *pushover* površi kod NSPA analize moguće je razmatrati i analizirati uticaje glavnih pravaca kod nesimetričnih zgrada, dok se kod dinamičke analize vremenskog odgovora, u zavisnosti od dominantnog pravca delovanja zemljotresa, razmatranje obično sprovodi preko akceleroograma [28]. Razmatranje nelinearnog odgovora sistema za multikomponentalno dejstvo zemljotresa moguće je još u fazi konceptualnog projektovanja vrednovanja projektnih rešenja [5]. Dinamičke analize mogućeg sudara susednih nesimetričnih višespratnih zgrada usled zemljotresa [29], kao i analize odgovora sistema s polukrutim ekscentričnim vezama u slučaju zemljotresa [7], ili analize efekta dejstva višestrukih zemljotresa [1] i dr., imajući u vidu da takve analize još nisu ugrađene u komercijalni softver, za sada nisu deo rutinskih inženjerskih aktivnosti u analizi uticaja zemljotresa.

the capacity domain, was done using the analogy with the 2D model – using a pushover curve. Additionally, bidirectional earthquake actions of the 3D models of a structure have been considered and incorporated in the analysis, as well as the torsion, irregularities in plan and along the height of the structure. In papers [14] and [19] numerical analyses of the responses of 3D building models are given, where the response of the system in the capacity domain has been considered for two orthogonal directions and two senses of each direction, as also shown in [11], [12] and [13]. In the papers [21], [22] and [23] the modal pushover analysis is given, based on calculation where scaling of two-component accelerograms of 3D building models was done, while the response is presented as the pushover curves for the two orthogonal directions. Pushover curve is obtained from the NSPA analysis which is based upon the incremental-iterative procedure, where the system response is followed all the way until the collapse [26], [27].

Seismic response of structures according to their performance in the nonlinear domain can be presented using the pushover surface by considering the two components of the seismic action. Construction and generation of the pushover surface is implemented by integrating the nonlinear responses given by individual pushover curves for different angles and multicomponent earthquake actions [4]. First, it is necessary to generate multicomponent accelerograms and response spectra for different angles relative to the component perpendicular to direction of the fault (*fault normal*) and a component in parallel to direction of the fault (*fault parallel*) [24], [25]. Since the application of the pushover surface in the presentation and consideration of structural performance is still at the initial stage, there are a number of questions which should be answered, such as: a more detailed mathematical formulation, typology, aspects of the application on real models of structures, special cases of pushover surfaces, advantages and disadvantages of using the pushover surface for presentation of seismic response, etc. The subject of research in this paper is the mathematical formulation and typology of pushover curves and surfaces for the general building structural models. Systematization of the types of pushover curves and surfaces is made according to the authors' valuable experience in a number of seismic analyses of numerical structural models. By considering the pushover surface using the NSPA analysis it is possible to consider and analyze the influence of the main directions of the non-symmetric buildings, while in dynamic analysis applying the time response and considering effects of the dominant earthquake direction, the analysis is normally conducted utilizing the accelerograms [28]. Consideration of the non-linear system response due to multicomponent earthquake action is possible even in the preliminary analysis [5]. Dynamic analysis of pounding of adjacent non-symmetric multi-story buildings during earthquakes [29], analysis of the seismic response of the system with semi rigid and eccentric connections [7], or analysis of the effects of multiple seismic actions [1] etc., are not a part of the routine engineering activities in earthquake analysis, since it is still unlikely that they are incorporated into the commercial software.

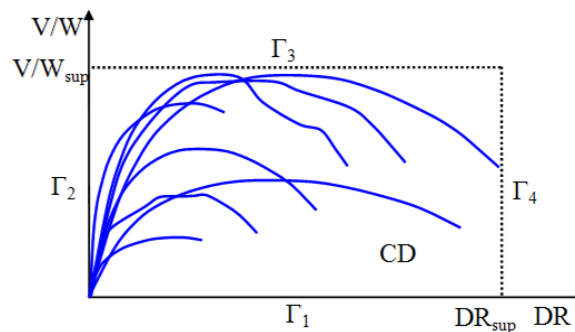
2 TIPOLOGIJA NSPA PUSHOVER KRIVIH

Analiza odgovora konstrukcija za dejstvo zemljotresa, pored vremenskog i frekventnog domena, razmatra se i u kapacitativnom domenu (CD), odnosno domenu analize kapaciteta nosivosti i deformacija konstrukcije. Odgovor 2D modela zgrada u kapacitativnom domenu prema nelinearnoj statičkoj pushover analizi, u opštem slučaju, definisan je granicama Γ_i (slika 1):

$$CD: \begin{cases} \Gamma_1 : DR \in [0, +\infty) \wedge V/W = 0 \\ \Gamma_2 : DR = 0 \wedge V/W \in [0, +\infty) \\ \Gamma_3 : DR \in [0, +\infty) \wedge V/W = (V/W)_{sup} \\ \Gamma_4 : DR = DR_{sup} \wedge V/W \in [0, +\infty) \end{cases}, \quad (1)$$

gde je Γ_1 globalni drift, ili horizontalni ugib, u oznaci DR (donja granica ili abscisa), Γ_2 relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta V/W (leva granica ili ordinata), Γ_3 gornja granica za supremum $(V/W)_{sup}$, Γ_4 desna granica za supremum DR_{sup} . Sa V označena je ukupna smičuća sila u osnovi objekta, a sa W ukupna težina. U slučaju odgovora zgrada u kapacitativnom domenu CD_{NSPA} , primenom NSPA analize, za skup diskretnih uređenih parova DR_i i $(V/W)_i$ može se pisati:

$$CD_{NSPA} : \bigcup_{i=1}^n \langle DR_i, (V/W)_i \rangle, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (2)$$



Slika 1. Odgovor 2D modela zgrada u kapacitativnom domenu
Figure 1. The response of 2D building models in a capacity domain

Model zgrade izlaže se dejstvu lateralnog seizmičkog opterećenja, a odgovor sistema prati se preko promene horizontalnog pomeranja najvišeg čvora zgrade. Inkrementalno-iterativna procedura izvršava se sve dok se ne dostigne unapred definisani nivo horizontalnog pomeranja D_{max} najvišeg čvora zgrade ili dok ne nastupi kolaps konstrukcije.

Definicija 1: NSPA pushover kriva $V/W=f(DR)$ jeste splajnom interpolirana kriva generisana povezivanjem diskretnih vrednosti iz inkrementalnih situacija $I_i \langle DR_i, (V/W)_i \rangle$ NSPA analize (slika 2):

$$V/W = f(DR), \quad (3)$$

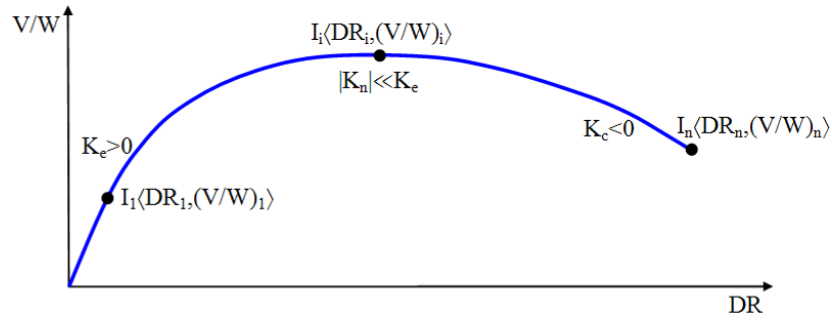
pri čemu je:

where:

$$I_i \langle DR_i, (V/W)_i \rangle \subset [V/W = f(DR)], \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4)$$

Analysis of the structural response to earthquake action, in addition to analysis in the time and frequency domains, is considered in the capacity domain (CD), i.e. the domain of the strength and deformation capacities of structures. Response of 2D building models in the capacity domain according to the nonlinear static pushover analysis is, in general, defined by boundaries Γ_i (Figure 1):

where Γ_1 is a global drift, or horizontal deflection, denoted as DR (lower border or abscissa), Γ_2 the relative value of the total shear force in the base of structure V/W (left border or ordinate), Γ_3 upper border for the supremum $(V/W)_{sup}$, Γ_4 right border for the supremum DR_{sup} , V represents the total shear force in the base of the structure, while W is the total weight. In the case of the response of buildings in the capacity domain CD_{NSPA} , by applying NSPA analysis, for the set of discrete and ordered pairs DR_i and $(V/W)_i$ it could be written:



Slika 2. Pushover kriva $V/W=f(DR)$
Figure 2. Pushover curve $V/W=f(DR)$

Uspostavljanje kontinuiteta veze između diskretnih vrednosti $I_i(DR_i, (V/W)_i)$ dobijenih NSPA analizom sprovodi se interpolacijom, gde se kao osnovni metod za uspostavljanje ove veze primenjuje linearna interpolacija. Mnogo bolje rešenje postiže se primenom interpolacije B-splajnovima, koji su generalizacija *Bezier*-ovih krivih [20]:

Establishing the continuity of the connection between discrete values $I_i(DR_i, (V/W)_i)$, which are obtained using the NSPA analysis, is achieved by interpolation, where the linear interpolation represents the main method for establishing this relationship. Much better solution is achieved using the B-spline interpolation, as a generalization of *Bezier's* curves [20]:

$$S(u) = \sum_{i=0}^m c_i N_i^n(u). \quad (5)$$

gde su $S(u)$ B-splajn kriva stepena n . c_i kontrolne tačke. dok je B-splajn bazna funkcija:

where: $S(u)$ represents a B-spline curve of a degree n . c_i control points. while the B-spline is a basis function:

$$N_i^0(u) = \begin{cases} 1 & \text{za } t_i \leq u \leq t_{i-1} \\ 0 & \text{inače} \end{cases}. \quad (6)$$

$$N_i^r(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+r} - t_i} N_i^{r-1}(u) + \frac{t_{i+r+1} - u}{t_{i+r+1} - t_{i+1}} N_{i+1}^{r-1}(u) \quad \text{za } 1 \leq r \leq n. \quad (7)$$

Reprezentativan model *pushover* krive karakterišu tri bitno različita domena: linearno-elastično ponašanje za koje je elastična krutost sistema pozitivna, $K_e > 0$, nelinearno ponašanje za koje je nelinearna krutost sistema $|K_n| \ll K_e$ i kolaps koji karakteriše negativna krutost sistema $K_c < 0$ i redukcija nosivosti. Tipologija *pushover* krivih, uvedena u ovom istraživanju, bazira se na analizi nelinearnog odgovora 3D modela zgrada, a takođe i odgovora određenog broja 2D višespratnih okvira [3], pošto oni participiraju kao konstruktivne celine zgrada. Kriterijumi na osnovu kojih se može sprovesti generalna podela *pushover* krivih jesu: globalna duktilnost μ , globalni driftovi za performansne nivoe armiranobetonskih okvirnih sistema (*structural performance levels*): DR_{IO} (IO – *immediate occupancy*), DR_{LS} (LS – *life safety*), DR_{CP} (CP – *collapse prevention*) i egzistencija linearnog (L – *linear*), nelinearnog (N – *nonlinear*) i kolapsnog (C – *collapse*) subdomena:

A representative model of pushover curve is characterized by the three very different domains: linear-elastic behaviour for which the elastic stiffness of the system is positive, $K_e > 0$, the nonlinear behaviour for which the nonlinear system stiffness is $|K_n| \ll K_e$ and the collapse which is characterized by a negative stiffness $K_c < 0$ and a strength reduction. The typology of pushover curves, introduced in this research, is based on an analysis of the nonlinear response of 3D building models, and also upon the response of a number of 2D multi-story frames [3], since they are participating as building's structural units. The criteria upon which the general classification of pushover curves may be done are: the global ductility μ , the global drifts for performance levels of the reinforced concrete frame structures: DR_{IO} (IO - immediate occupancy), DR_{LS} (LS - life safety), DR_{CP} (CP - collapse prevention) and the existence of the linear (L), a nonlinear (N) and a collapse (C) subdomain:

$$L = [0, DR_y \pm \varepsilon_1]. \quad N = [DR_y \pm \varepsilon_1, DR_c \pm \varepsilon_2]. \quad C = [DR_c \pm \varepsilon_2, DR_{max}]. \quad (8)$$

U jednačini (8) DR_y jeste globalni drift za nivo granice tečenja, DR_c globalni drift za nivo iniciranja kolapsnog subdomena, DR_{max} globalni drift za nivo maksimalnih deformacija i ε_i su faktori korekcije za granične kriterijume. Veliki broj numeričkih testova, sprovedenih na okvirnim sistemima, ukazuje na varijaciju u odgovoru

Introduced in Eq.(8) DR_y is the global drift for the level of yield strength, DR_c global drift for the level of the collapse subdomain initiation, DR_{max} global drift for the level of maximum deformations and ε_i are the correction factors for borderline criteria. A large number of numerical tests, conducted upon the frame systems,

pushover krivih pri nelinearnom ponašanju sistema.

Generalna podela zgrada prema nelinearnom odgovoru jeste na zgrade visoke duktilnosti (DCH – *high class ductility*), srednje duktilnosti (DCM – *medium class ductility*) i niske duktilnosti (DCL – *low class ductility*) [6]. Prvi slučaj nelinearnog odgovora karakteriše visoka duktilnost DCH, na osnovu čega su izvedene osobine krutosti sistema (slika 3) [2]:

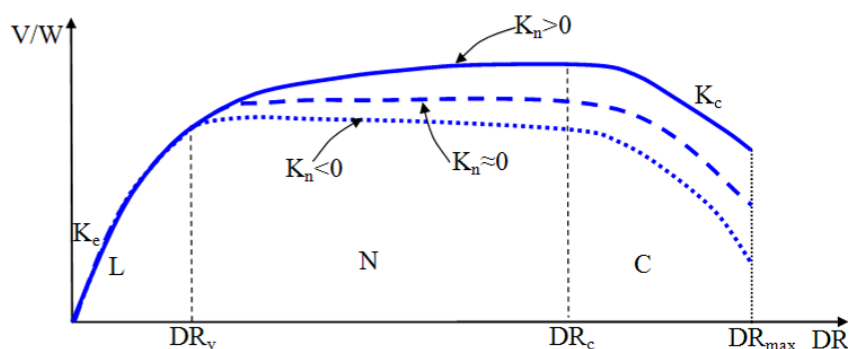
$$\exists L, \exists N, \exists C, \quad K_e > 0, \quad |K_n| < K_e, \quad K_c < 0, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (9)$$

Izražen N domen ukazuje na povoljno duktilno ponašanje zgrada s obzirom na mogućnost znatne disipacije histerezisne energije i plastifikaciju sistema povoljnim mehanizmima loma. Prema tome, moguće su sledeće varijante nelinearne krutosti sistema: $K_n > 0$, $K_n \approx 0$ ($K_n \ll K_e$) i $K_n < 0$.

showed the variation in the responses of pushover curves during the nonlinear behaviour of the system.

The general classification of buildings according to nonlinear response has been made. Thus, there are a high ductility class (DCH), a medium ductility class (DCM) and a low ductility class (DCL) [6]. The first case of nonlinear response is characterized by the high ductility DCH, based on which the stiffness properties of the system are derived (Fig. 3) [2]:

Prominent N domain points to a favourable ductile behaviour of buildings due to the possibility of substantial hysteretic energy dissipation and the plasticity of the system using favourable fracture mechanisms. Thus, the following variations of the nonlinear stiffness of the system are possible: $K_n > 0$, $K_n \approx 0$ ($K_n \ll K_e$) and $K_n < 0$.



Slika 3. Odgovori sistema s duktilnim DCH ponašanjem $\exists L, \exists N$ i $\exists C$
Figure 3. System responses with ductile DCH behaviour $\exists L, \exists N$ and $\exists C$

Razmatranje nastanka kolapsa sistema kompleksan je problem i zahteva višekriterijumsku i višeparametarsku analizu, međutim može da se konstatuje da ukoliko je $K_n > 0$, tada kolaps konstrukcije, u najvećem broju slučajeva, nastupa u C subdomenu. Ukoliko je $K_n \approx 0$, tada kolaps može nastupiti i u N i u C subdomenu, a ako je $K_n < 0$, tada je iniciranje kolapsa, između ostalog, funkcija stepena redukcije nosivosti sistema i DR_{CP} , pri čemu će s velikom verovatnoćom nastupiti u N domenu.

Drugi slučaj nelinearnog odgovora karakteriše DCM i DCH duktilnost, pri čemu nema jasno izraženog C subdomena (slika 4):

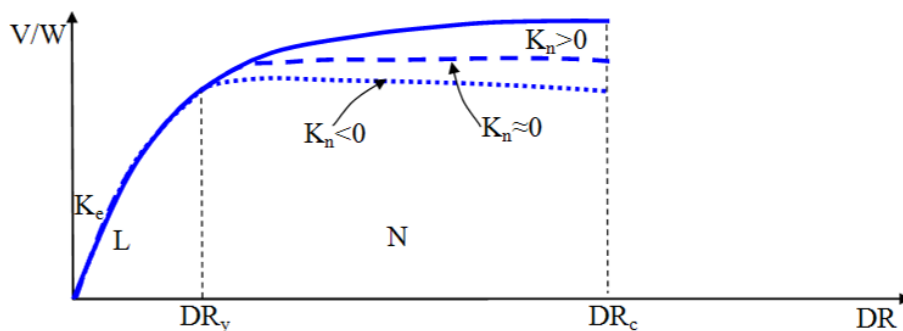
$$\exists L, \exists N, \quad K_e > 0, \quad |K_n| < K_e, \quad K_c = 0, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (10)$$

Moguće varijante nelinearne krutosti sistema K_n iste su kao i za prethodni slučaj: $K_n > 0$, $K_n \approx 0$ ($K_n \ll K_e$) i $K_n < 0$. Ovakav odgovor sistema karakteriše egzistencija L i N domena, a s druge strane, ovakav odgovor sistema može biti i problem numeričkog rešenja, pošto je kod određenih numeričkih modela potreban veliki broj inkremenata i iteracija, a potrebno je i pooštriti kriterijume tolerancije za rezidualno (neizbalansirano) opterećenje.

Consideration of the system collapse occurrence is a complex problem and requires a multiparametric analysis based on multiple criteria. However, it may be concluded that if $K_n > 0$, then the collapse of structures, in most cases, occurs in the C subdomain. If $K_n \approx 0$, then the collapse may occur in the N and C subdomain, and if $K_n < 0$, then the initiation of the collapse, among other things, depends on the level of the strength reduction of the system and the global drift DR_{CP} , while there is a high probability that it will occur in the N domain.

Another case of nonlinear response is characterized by DCM and DCH ductility, where the C subdomain is not clearly distinguished (Figure 4):

Possible variants of the nonlinear system stiffness K_n are the same as in the previous case: $K_n > 0$, $K_n \approx 0$ ($K_n \ll K_e$) and $K_n < 0$. Such a system response is characterized by the existence of L and N domains, but on the other hand, this system response might be due to a problem with a numerical solution, since certain numerical models need a large number of increments and iterations, and also it is necessary to narrow the tolerance criteria for the residual (unbalanced) load.

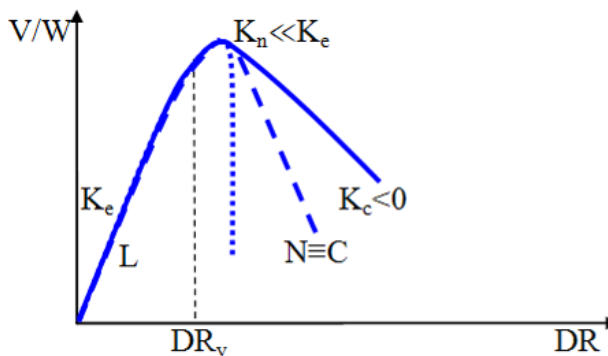


Slika 4. Odgovori sistema s duktilnim DCM i DCH ponašanjem $\exists L, \exists N$ i $\nexists C$
 Figure 4. System responses with ductile DCM and DCH behaviour $\exists L, \exists N$ and $\nexists C$

Treći slučaj nelinearnog odgovora karakteriše nizak nivo duktilnosti DCL ili neduktilno to jest krto ponašanje, pri čemu nema jasno izraženog N i C subdomena (slika 5). U tom slučaju važi sledeće:

The third case of nonlinear response is characterized by a low level of ductility DCL or nonductile, i.e. brittle behavior, without the clearly expressed N and C subdomains (Figure 5). In that case the following applies:

$$\exists L, \exists N \equiv C, \quad K_e > 0, \quad K_n < 0, \quad K_c < 0, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathbb{R}^+. \quad (11)$$



Slika 5. Odgovori sistema s niskim nivoom duktilnosti $\exists L, \exists N$ (ili $\nexists N$), $\exists C$ (ili $\nexists C$)
 Figure 5. System responses with low ductility $\exists L, \exists N$ (or $\nexists N$), $\exists C$ (or $\nexists C$)

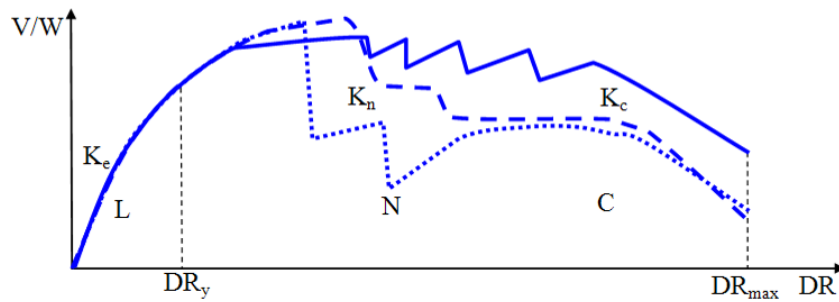
Prethodno su prezentovani generalizovani modeli nelinearnog ponašanja, međutim, u određenim situacijama, odgovor sistema može takođe pripadati i prelaznoj kategoriji. Karakterističan primer za to jeste nelinearni odgovor sistema s naglom promenom K_n u N domenu, tzv. oblik zubaca testere (*saw-tooth shape*) (slika 6) [10]:

Generalized models of nonlinear behaviour have been previously presented. However, in certain situations, the system's response may also belong to a transitional category. A characteristic example is a nonlinear response of the system with a sudden change of K_n in N domain (so called saw-tooth shape) (Figure 6) [10]:

$$N: \quad K_n > 0, \quad K_n \approx 0, \quad K_n < 0. \quad (12)$$

Sistem se generalno ponaša duktilno, dok je promena krutosti u N domenu frekventna. Prikazivanje *pushover* krive u tom slučaju može da se izvrši primenom kompatibilne krive kapaciteta.

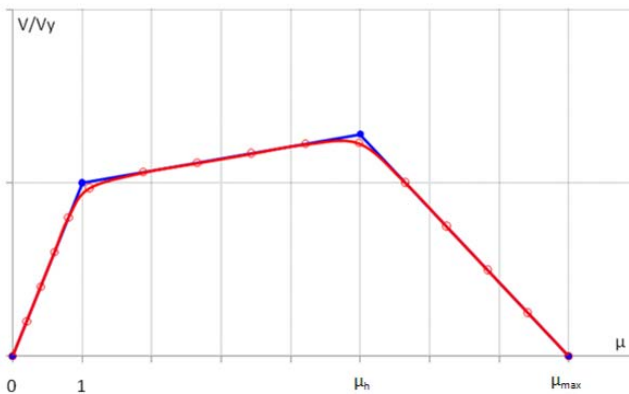
The system generally behaves in a ductile manner, while the change of stiffness in N domain is frequent. Presentation of the pushover curve in that case may be achieved by using the compatible capacity curve.



Slika 6. Odgovori sistema s duktilnim ponašanjem $\exists L$, $\exists N$, $\exists C$ i promenljivim K_n
 Figure 6. System responses with ductile behaviour $\exists L$, $\exists N$, $\exists C$ and variable K_n

Klasifikacija tipova *pushover* krivih izvedena je na osnovu prethodno prikazanih osobina krutosti sistema i analizom varijacije parametara: μ duktilnosti, μ_h duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja i α koeficijenta odnosa krutosti u nelinearnom i linearnom domenu. Sve *pushover* krive prvo su konstruisane kao poligonalne linije na osnovu kojih su duž segmenata izabrane diskretne međuvrednosti, a zatim je sprovedena interpolacija splajnovima (slika 7). Dodatno je sprovedeno filtriranje diskretnih vrednosti za $\mu=1$ i μ_h . U tabeli 1 prikazane su generisane *pushover* krive, pri čemu je na abscisi vrednost μ , a na ordinati normalizovana vrednost V/V_y . Razmatrane su *pushover* krive u funkciji varijacije parametara $\alpha>0$, $\alpha\approx 0$, $\alpha<0$ i duktilnosti $\mu=\mu_h$ i $\mu>\mu_h$.

Classification of pushover curves is done according to the previously presented stiffness properties and upon the analysis of the variation of parameters: μ ductility, μ_h ductility in hardening/softening zone and α which represents the ratio of stiffnesses in the nonlinear and linear domains. All pushover curves were constructed as polygonal lines. Along the segments certain discrete intermediate values are selected and then the spline interpolation is conducted (Figure 7). Discrete values for $\mu=1$ and μ_h have been filtered additionally. Table 1 shows the generated pushover curves, where value of μ is along the abscissa and the normalized value of V/V_y along the ordinate. The pushover curves were considered as a function of variation of parameters $\alpha>0$, $\alpha\approx 0$, $\alpha<0$ and ductility $\mu=\mu_h$ and $\mu>\mu_h$.



Slika 7. Interpolirana pushover kriva s filtriranjem diskretnih vrednosti za $\mu=1$ i μ_h
 Figure 7. Interpolated pushover curve with filtering of discrete values for $\mu=1$ and μ_h

Tabela 1. Generisane pushover krive u funkciji varijacije parametara μ , μ_h i α
 Table 1. Generated pushover curves as a function of variation of parameters μ , μ_h and α

	$\alpha>0$	$\alpha\approx 0$	$\alpha<0$
$\mu=\mu_h$			
$\mu>\mu_h$			

3 TIPOLOGIJA NSPA PUSHOVER POVRŠI

Razmatranje 3D seizmičkog odgovora zgrada moguće je sprovesti primenom *pushover* površi (*pushover surface*) za slučaj da se uzimaju u obzir dve istovremene ortogonalne komponente seizmičkog dejstva. Konstrukcija i generisanje *pushover* površi sprovodi se integracijom nelinearnih odgovora prikazanih preko individualnih *pushover* krivih koje su određene za različite uglove dejstva zemljotresa simultano u dva ortogonalna pravca [4]. Model zgrade izlaže se dejstvu lateralnog seizmičkog opterećenja čija je raspodela konstantna za konvencionalnu NSPA analizu (NSCPA – *Nonlinear Static Conventional Pushover Analysis*) u toku inkrementalnih proračunskih situacija. U slučaju adaptivne NSPA analize (NSAPA – *Nonlinear Static Adaptive Pushover Analysis*), raspodela lateralnog seizmičkog opterećenja je promenljiva u toku inkrementalnih opterećenja [18]. NSCPA i NSAPA analize sprovode se za različite vrednosti ugla θ_i , kojim je definisan pravac zemljotresa, u intervalu $\theta=[0,360^\circ]$, po jedan slučaj opterećenja za svaki inkrement priraštaja ugla $\Delta\theta$. U fazama proračuna zgrade razmatraju se svi stepeni slobode, ali se monitoring odgovora sistema prati i prezentuje za odgovarajući pravac (ugao θ_i) i predstavlja *pushover* krivom za taj pravac. Integracijom ovako određenih *pushover* krivih $V/W=f(DR)_\theta$ po uglovima θ_i generiše se *pushover* površ 3D modela zgrade.

Odgovor 3D modela zgrada u kapacitivnom domenu prema NSPA analizi, a prezentovan primenom *pushover* krivih za uglove θ_i , u opštem slučaju definisan je granicama Γ_i (slika 8):

$$CD : \begin{cases} \Gamma_1 : (DR_{x,i}, DR_{y,i}) \in [0, +\infty) \wedge V/W = 0 \\ \Gamma_2 : (DR_{x,i}, DR_{y,i}) \in [0, +\infty) \wedge V/W = (V/W)_{sup} \\ \Gamma_3 : (DR_{x,i}, DR_{y,i}) = DR_{sup} \wedge V/W \in [0, +\infty) \end{cases}, \quad (13)$$

gde je Γ_1 donja granična ravan (baza) DR_x-DR_y za $V/W=0$, Γ_2 gornja granična ravan (baza) DR_x-DR_y za supremum $(V/W)_{sup}$, a Γ_3 granična površ za $DR_{x,sup}$ i $DR_{y,sup}$ (omotač). U slučaju odgovora NSPA analize zgrada u kapacitivnom domenu CD_{NSPA} za skup diskretnih uređenih parova DR_i i $(V/W)_i$ može se pisati:

$$CD_{NSPA} = \bigcup_{i=1}^n \langle DR_{x,i}, DR_{y,i}, (V/W)_i \rangle, \quad \forall (DR_{x,i}, DR_{y,i}, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+, \quad (14)$$

dok odgovarajuća *pushover* kriva predstavlja interpolirane diskretne uređene parove $\langle DR_{x,i}, DR_{y,i}, (V/W)_i \rangle$:

$$V/W = f(DR_x, DR_y). \quad (15)$$

Na slici 10a prikazane su *pushover* krive generisane po uglovima θ_i u 2D ortogonalnom koordinatnom sistemu. dok su na slici 10b prikazane *pushover* krive u 3D ortogonalnom koordinatnom sistemu u izometriji. a generisane transformacijom:

$$DR_x = DR_r \cos\theta. \quad DR_y = DR_r \sin\theta. \quad DR_r = \sqrt{DR_x^2 + DR_y^2}. \quad (16)$$

3 TYPOLOGY OF NSPA PUSHOVER SURFACES

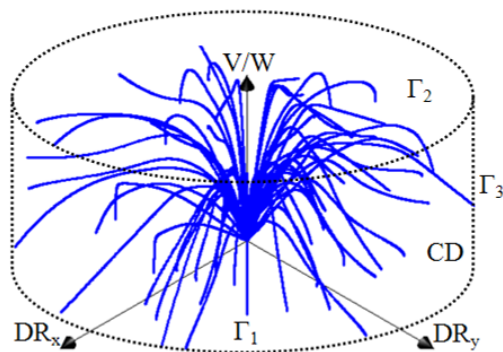
Consideration of 3D seismic response of buildings is carried out by using a pushover surface in a case when two simultaneous orthogonal components of the seismic action are taken into account. Construction and generation of pushover surface is performed by integrating the nonlinear responses presented by the individual pushover curves determined for different angles of earthquake actions simultaneously in two orthogonal directions [4]. Building model is exposed to actions of lateral seismic load whose distribution is constant for conventional NSPA analysis (NSCPA – Nonlinear Static Conventional Pushover Analysis) during the incremental load cases. In the case of the adaptive NSPA analysis (NSAPA – Nonlinear Static Adaptive Pushover Analysis), distribution of lateral seismic load varies during the incremental loading [18]. NSCPA and NSAPA analyses are carried out for different values of the angle θ_i , which is defining direction of an earthquake, in the interval $\theta=[0,360^\circ]$, one load case for each incremental angle $\Delta\theta$. In the stages of building analysis, all degrees of freedom are considered, but the monitoring of the system response is conducted for the corresponding direction (angle θ_i) and presented by the pushover curve for that direction. By integrating the set of so obtained pushover curves $V/W=f(DR)_\theta$ for angles θ_i , pushover surface of a 3D model of building is generated.

Response of 3D models of buildings in the capacity domain according to NSPA analysis, and presented using the pushover curves for the angles θ_i , in the general case is defined by the boundaries Γ_i (Figure 8):

where Γ_1 represents a bottom boundary plane (base) DR_x-DR_y for $V/W=0$, Γ_2 represents upper boundary plane (base) DR_x-DR_y for the supremum $(V/W)_{sup}$, while Γ_3 represents boundary surface for $DR_{x,sup}$ and $DR_{y,sup}$ (mantle). In the case of NSPA analyses of buildings' responses in the capacity domain CD_{NSPA} for a set of discrete ordered pairs DR_i and $(V/W)_i$ it may be written:

while the corresponding pushover curve represents the interpolated discrete ordered pairs $\langle DR_{x,i}, DR_{y,i}, (V/W)_i \rangle$:

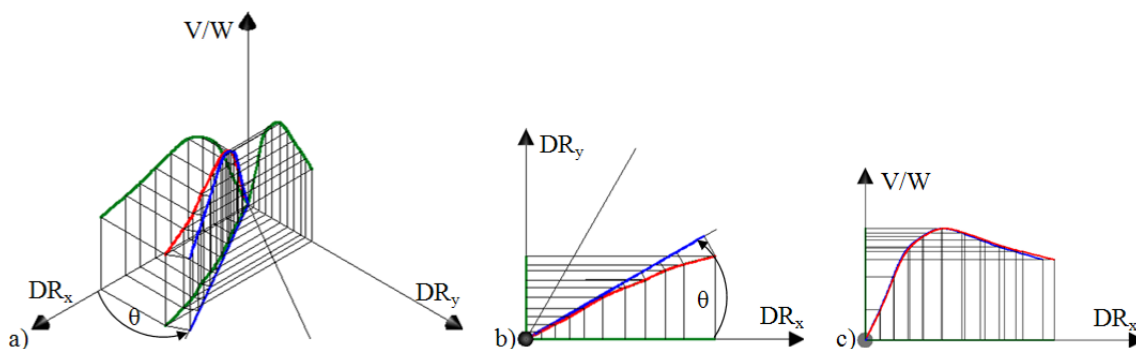
Figure 10a shows the pushover curves generated for the angles θ_i in a 2D orthogonal coordinate system. while Figure 10b shows pushover curves in a 3D orthogonal coordinate system in isometry. generated by transformation:



Slika 8. Odgovor 3D modela zgrada u kapacitivnom domenu
Figure 8. The response of 3D models of buildings in the capacity domain

Konstrukcija *pushover* krive $V/W=f(DR)_\theta$ za ugao θ sprovodi se iz projekcije *pushover* krive sistema za bidirekciono seizmičko dejstvo na vertikalnu ravan DR_θ - V/W za ugao θ (slika 9a). Ortogonalne projekcije *pushover* krive za ugao θ prikazane su na slikama 9b i 9c za DR_x - DR_y ravan i DR_x - V/W ravan, respektivno.

Construction of *pushover* curve $V/W=f(DR)_\theta$ for the angle θ is carried out from the projection of *pushover* curve of the system for bidirectional seismic action on the vertical plane DR_θ - V/W for the angle θ (Figure 9a). Orthogonal projections of *pushover* curve for the angle θ are shown in Figures 9b and 9c for DR_x - DR_y and DR_x - V/W plane, respectively.



Slika 9. *Pushover* kriva u 3D koordinatnom sistemu za bidirekciono seizmičko dejstvo za ugao θ : a) projekcija na ortogonalne ravni DR_x - V/W , DR_y - V/W , DR_x - DR_y i za ugao θ ; b) DR_x - DR_y ravan; c) DR_x - V/W ravan
Figure 9. *Pushover* curve in a 3D coordinate system for the bidirectional seismic action for the angle θ : a) projection on the orthogonal plane DR_x - V/W , DR_y - V/W , DR_x - DR_y and for an angle θ ; b) DR_x - DR_y plane; c) DR_x - V/W plane

Definicija 2: NSPA *pushover* površ 3D modela zgrade $V/W=f(DR_x, DR_y)$ jeste glatka interpolirana asimetrična rotaciona površ generisana povezivanjem diskretnih vrednosti iz inkrementalnih situacija $I_i(DR_i, (V/W)_{z,i}, \theta_i)$ NSPA analiza individualnih *pushover* krivih $(V/W)_i=f(DR_i, \theta_i)$ splajnovima u tangencijalnom pravcu $(V/W)_j=g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ [4]:

Definition 2: NSPA *pushover* surface of a 3D model building $V/W=f(DR_x, DR_y)$ is an asymmetric smooth interpolated rotational surface generated by connecting discrete values obtained from incremental situations $I_i(DR_i, (V/W)_{z,i}, \theta_i)$ NSPA analysis of individual *pushover* curves $(V/W)_i=f(DR_i, \theta_i)$ using splines in the tangential direction $(V/W)_j=g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ [4]:

$$V/W = f(DR_x, DR_y) = \left[\bigcup_{\theta_i=0}^{360^\circ} f(DR_i, \theta_i) \right] \cup \left[\bigcup_{j=0}^{DR_{max}} g(DR_{x,j}, DR_{y,j}) \right], \quad (17)$$

pri čemu je:

where:

$$I_i(DR_i, (V/W)_{z,i}, \theta_i) \subset [V/W = f(DR_x, DR_y)], \quad (18)$$

$$DR_{x,j}, DR_{y,j} \in [0, DR_{max}], \quad \theta_i \in [0, 360^\circ], \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (19)$$

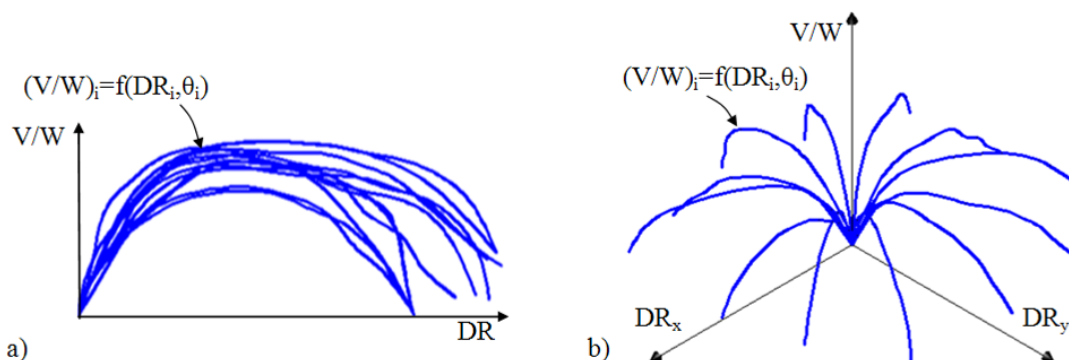
Na slici 10a prikazane su *pushover* krive generisane po uglovima θ_i u 2D ortogonalnom koordinatnom sistemu, dok su na slici 10b prikazane *pushover* krive u

Figure 10a shows the *pushover* curves generated for the angles θ_i in a 2D orthogonal coordinate system, while Figure 10b shows *pushover* curves in a 3D

3D ortogonalnom koordinatnom sistemu u izometriji, a generisane transformacijom:

$$DR_x = DR_r \cos \theta, \quad DR_y = DR_r \sin \theta, \quad DR_r = \sqrt{DR_x^2 + DR_y^2}. \quad (20)$$

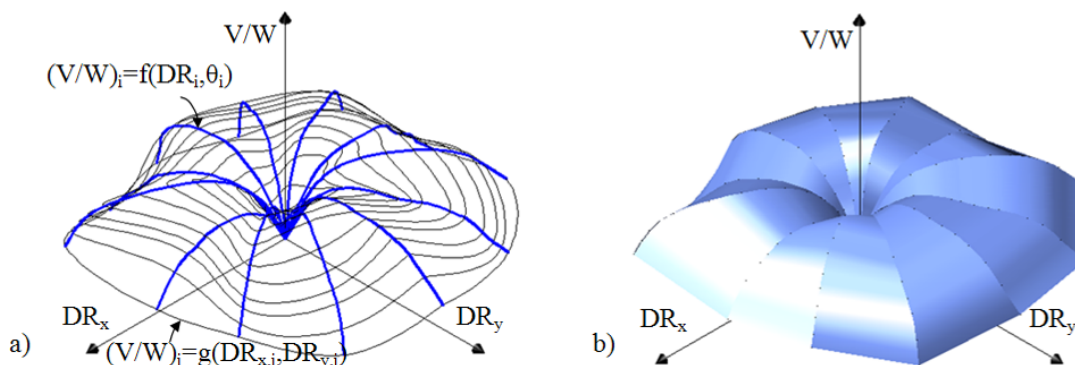
orthogonal coordinate system in isometry, generated by transformation:



Slika 10. a) Pushover krive generisane za uglove θ_i u 2D ortogonalnom koordinatnom sistemu; b) NSA pushover krive u 3D ortogonalnom koordinatnom sistemu u izometriji [4]
 Figure 10. a) Pushover curves generated for angles θ_i in a 2D orthogonal coordinate system; b) NSA pushover curves in a 3D orthogonal coordinate system in isometry [4]

3D mrežni model pushover krivih, povezanih splajnovima u tangencijalnom pravcu, prikazan je na slici 11a, dok je na slici 11b prikazan 3D model pushover površi u renderovanom prikazu.

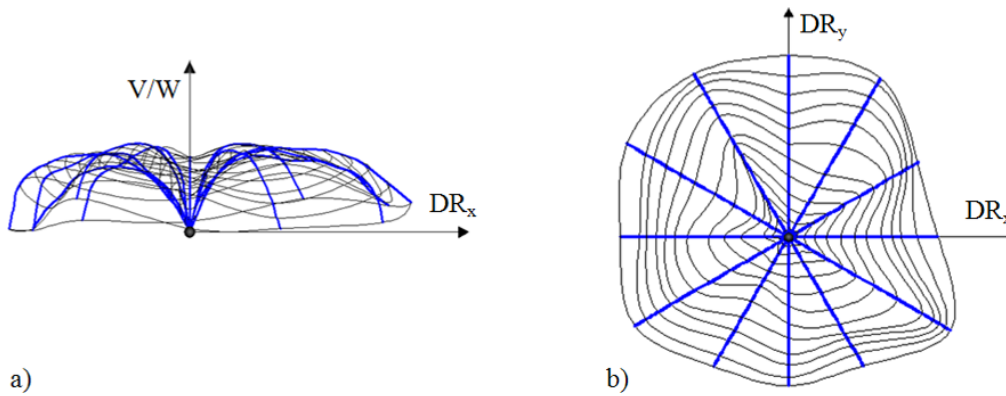
3D wireframe model of pushover curves, connected with splines in a tangential direction, is shown in Figure 11a, while Figure 11b shows a 3D model of the pushover surface in a rendered view.



Slika 11. a) 3D mrežni model pushover kriva; b) 3D renderovana pushover površ [4]
 Figure 11. a) 3D wireframe model of pushover curves, b) 3D rendered pushover surface [4]

Prikazana pushover površ predstavlja opšti slučaj pushover površi za 3D model asimetrične neregularne zgrade i za analizirane uglove θ_i . Ortogonalne projekcije date pushover površi prikazane su na slici 12 za DR_x - V/W i DR_x - DR_y ravni. Splajnovi u tangencijalnom pravcu $(V/W)_j = g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ povezuju diskretne vrednosti iz inkrementalnih situacija $I_i(DR_i, (V/W)_{z,i}, \theta_i)$ NSA analiza, pa, u opštem slučaju, nisu na ekvidistantnom odstojanju (slika 12a). S druge strane, ovi splajnovi, u opštem slučaju, nisu ni koncentrični krugovi (slika 12b).

Presented pushover surface represents the general case of a pushover surface for the 3D model of asymmetric and irregular building and analyzed angles θ_i . Orthogonal projections of given pushover surface are shown in the Figure 12 for the DR_x - V/W and DR_x - DR_y planes. Splines in the tangential direction $(V/W)_j = g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ connect discrete values from incremental situations $I_i(DR_i, (V/W)_{z,i}, \theta_i)$ of NSA analyses and, in general, are not equidistant (Figure 12a). In addition, these splines, in general, are not concentric circles either (Figure 12b).



Slika 12. Ortogonalne projekcije za opšti slučaj pushover površi: a) DR_x - V/W , b) DR_x - DR_y ravan [4]
 Figure 12. Orthogonal projections for the general case of pushover surface: a) DR_x - V/W , b) DR_x - DR_y plane [4]

Uspostavljanje kontinuiteta veze između diskretnih vrednosti $I_i(DR_i, (V/W)_i)$, odnosno između *pushover* krivih $(V/W)_i=f(DR_i, \theta_i)$ u radialnom pravcu i krivih $(V/W)_j=g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ u tangencijalnom pravcu, sprovodi se primenom *Bezier*-ove površi [20]:

Establishing continuity of the connection between discrete values $I_i(DR_i, (V/W)_i)$, or between the *pushover* curves $(V/W)_i=f(DR_i, \theta_i)$ in the radial direction and $(V/W)_j=g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ curves in the tangential direction, is implemented using the *Bezier's* surface [20]:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) b_{i,j}, \quad (21)$$

gde je *Bernstein*-ov polinom:

Where the *Bernstein's* polynomial is given by:

$$B_i^n(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i}. \quad (22)$$

Kontrolni čvorovi definišu oblik *NSPA pushover* površi, dok vektor čvora određuje gde i kako *pushover* površ dodiruje kontrolne čvorove.

Control nodes define the shape of *pushover* surface, while the vector of the node determines where and how the *pushover* surface touches the control nodes.

Analogija u geometrijskoj identifikaciji i matematičkoj prezentaciji *pushover* površi uspostavljena je sa polutorusnom površi kod koje je veći radijus torusa ekvivalentan manjem radijusu torusa a (*horn torus*) (slika 13a) [8]. Parametarske jednačine ovako generisane polutorusne površi glase:

The analogy in geometrical identification and mathematical presentation of *pushover* surface may be established with a semi-torus surface where larger radius of torus is equivalent to smaller radius of the torus (*horn torus*) (Figure 13a) [8]. Parametric equations of the generated semi-torus surface are as follows:

$$x = (a + a \cos v) \cos u, \quad y = (a + a \cos v) \sin u, \quad z = a \sin v, \quad (23)$$

gde je centralni deo levkasta površ za koju važi:

where the central part is the funnel surface for which the following applies:

$$x = u \cos v, \quad y = u \sin v, \quad z = a \ln u. \quad (24)$$

Pushover površ jeste složena asimetrična površ koja se sastoji iz centralne površi i rotacione poligonale površi, tako da svojom geometrijom asocira na polutorusnu površ, dok se u prirodi poređenje može uspostaviti s vulkanskim kraterom. Ukoliko se uzme u obzir to da je do nivoa iniciranja granice tečenja zavisnost sila – pomeranje linearna, tada je centralni deo *pushover* površi konusna površ za koju važi parametarska jednačina:

Pushover surface is a complex asymmetric surface consisting of the central surface and rotating polygonal surface, so its geometry resembles a semi-torus surface, while in the reality the association may be found with a volcanic crater. If one takes into account that up to the level of initiation of yield strength the force-displacement dependence is linear, then the central part of the *pushover* surface is a conical surface for which parametric equations may be applied:

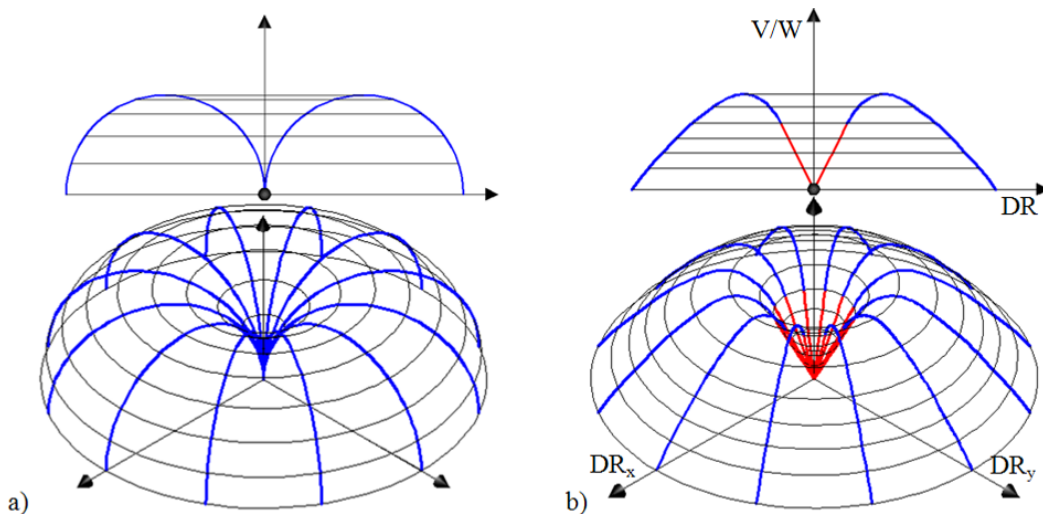
$$x = \frac{h-u}{h} a \cos \theta, \quad y = \frac{h-u}{h} a \sin \theta, \quad z = u, \quad (25)$$

gde je h visina konusne površi (slika 13b). Na složenost *pushover* površi ukazuje i promenljivost *Gauss*-ove krivine u zavisnosti od razmatranog poddomena

where h is the height of the conical surface (Figure 13b). The variability of the *Gaussian* curvature depending on the considered subdomain of a *pushover* surface of a

diskretnog modela *pushover* površi.

discrete model also indicates the complexity of the *pushover* surface.



Slika 13. Analogija u geometrijskoj identifikaciji i matematičkoj prezentaciji *pushover* površi: a) polutorusna površ sa $R=a$ (horn torus); b) složena rotaciona *pushover* površ generisana iz konusne i poligonalne površi
 Figure 13. The analogy in geometrical identification and mathematical presentation of *pushover* surface: a) semi-torus surface with $R=a$ (horn torus), b) a complex rotational *pushover* surface generated from the conical and polygonal surfaces

Mnoga softverska rešenja primenjuju interpolaciju površi za određene matematičke funkcije i mapiranje, dok manji broj njih ima mogućnost prezentacije zakrivljene površi za diskretne vrednosti koordinata tačaka koje nisu uniformno raspodeljene. Problem koji se može pojaviti kod interpolacije *pushover* površi u ovom slučaju jeste odstupanje od realistične prezentacije, tako što se u određenim slučajevima diskretne vrednosti ne povezuju direktno interpolacionim funkcijama. Najbolje rešenje dobija se kada se diskretne vrednosti linearno interpoliraju i direktno povezuju u prostornom koordinatnom sistemu. Na taj način, generisana *pushover* površ formira se iz niza četvorouglova (trapeza), dok se dodatna rafiniranost može postići diskretizacijom trouglovima.

Tipološka analiza *pushover* površi znatno je kompleksnija od tipologije *pushover* krivih, pošto u jednoj *pushover* površi učestvuju više *pushover* krivih. Generalno, tipologija se može izvršiti s podelom površi na dve bitno različite grupe [4]: sa konstantnim znakom krutosti K_n u nelinearnom domenu za sve *pushover* krive i sa promenljivim znakom krutosti K_n u nelinearnom domenu za *pushover* krive. U grupi sa konstantnim znakom K_n moguće su varijacije: $K_n > 0$ za sve *pushover* krive, $K_n \approx 0$ za sve *pushover* krive i $K_n < 0$ za sve *pushover* krive, uz značajno učešće $P-\Delta$ efekata. U grupi sa promenljivim znakom K_n moguća je situacija da određene *pushover* krive imaju $K_n > 0$, a da neke druge krive imaju $K_n < 0$. Ovakav odgovor sistema jeste posledica znatne razlike tangentne krutosti zgrade za dva ortogonalna pravca. Ukoliko se uzme u obzir ispitivanje egzistencije linearnog, nelinearnog i kolapsnog subdomena, tada postoji još veći broj varijacija *pushover* površi.

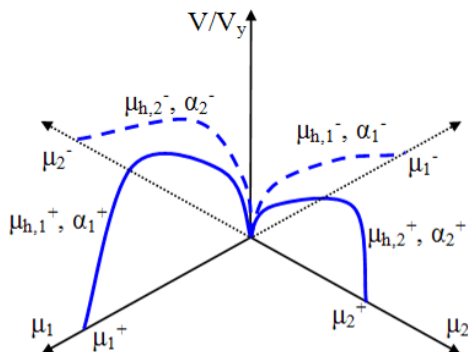
Generalizacija u tipologiji *pushover* površi izvedena je u funkciji varijacije μ , μ_h i α parametara za jedan glavni

A large number of software solutions use the surface interpolation for the given mathematical functions and mappings, while only few of them have the possibility to present a curved surface for discrete values of point coordinates that are not uniformly distributed. A problem that can occur during the *pushover* surface interpolation in this case is a deviation from the realistic presentation, so that in certain cases the discrete values are not directly connected by the interpolating functions. The best solution is obtained when the discrete values are linearly interpolated and directly linked in the spatial coordinate system. The *pushover* surface generated in this way is formed by a series of trapezoids, while an additional refinement may be achieved by discretization using triangles.

Typological analysis of the *pushover* surface is considerably more complex than the typology of *pushover* curves, since in one *pushover* surface more *pushover* curves participate. Overall, the typology may be made by classification of surfaces into the two significantly different groups [4]: with a constant sign of stiffness K_n in the nonlinear domain for all *pushover* curves and with a variable signs of stiffness in the nonlinear domain K_n for *pushover* curves. In the group with a constant sign K_n variations are possible: $K_n > 0$ for all *pushover* curves, $K_n \approx 0$ for all *pushover* curves and $K_n < 0$ for all *pushover* curves, with a significant participation of $P-\Delta$ effects. In the group with a variable sign of K_n for *pushover* curves it is possible that certain *pushover* curves have $K_n > 0$, while some other curves have $K_n < 0$. Such a response of the system is the result of significant differences in the tangent stiffness of the building in two orthogonal directions. If one takes into account the existence of linear, nonlinear and collapse subdomains, then there is an even larger variation of *pushover* surfaces.

pravac i za dva glavna pravca (slika 14). U slučaju varijacije μ , μ_h i α parametara kod *pushover* površi samo za jedan glavni pravac, razmatrani su slučajevi: identični parametri po smerovima jednog (svih) pravca i različiti parametri po smerovima jednog pravca.

Generalization in the typology of pushover surface is derived as a function of variation of parameters μ , μ_h and α for one and for two principal directions (Figure 14). In the case of variations of parameters μ , μ_h and α of the pushover surface only for one main direction, the following cases have been considered: identical parameters in the senses of one (all) direction and different parameters in senses of one direction.


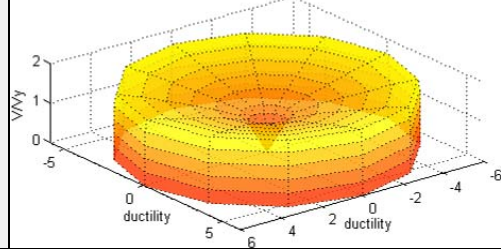

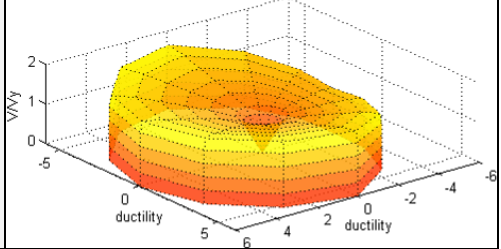

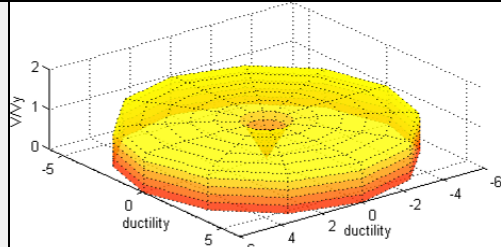

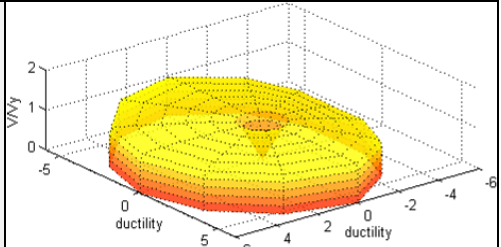


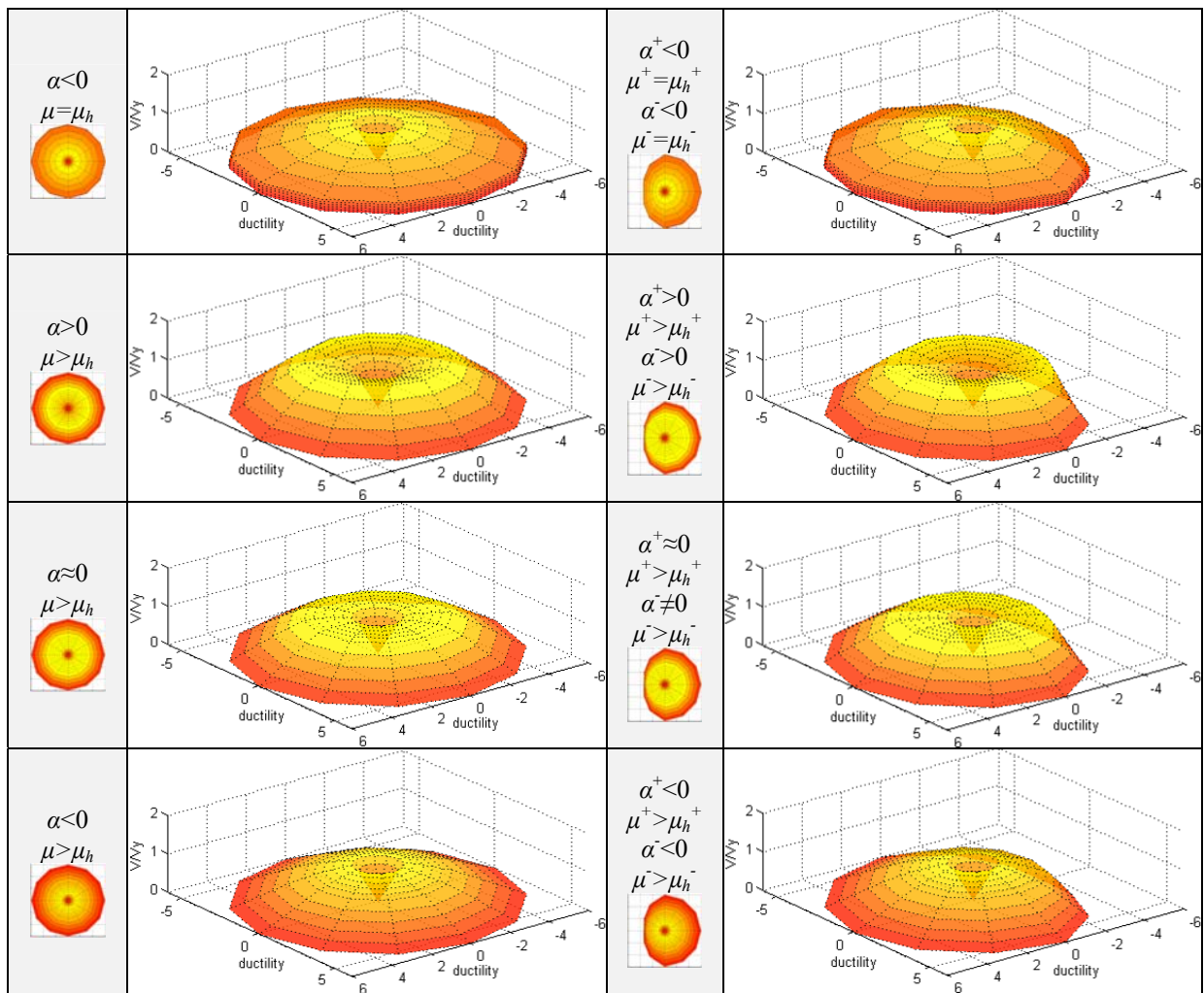
Slika 14. Generalizacija u tipologiji pushover površi u funkciji varijacije parametara μ , μ_h i α
 Figure 14. Generalization in the typology of pushover surface as a function of variation of parameters μ , μ_h and α

Pushover površi generisane su primenom softvera MATLAB [17], gde su diskretne vrednosti linearno interpolirane i direktno povezane u prostornom koordinatnom sistemu. U tabeli 2 prikazane su generisane *pushover* površi u funkciji varijacije parametra $\alpha > 0$, $\alpha \approx 0$, $\alpha < 0$ i duktilnost $\mu = \mu_h$ i $\mu > \mu_h$ za jedan glavni pravac.

Pushover surfaces were generated using the MATLAB software [17], where the discrete values were linearly interpolated and directly connected in the spatial coordinate system. Table 2 shows the generated pushover surface as the function of the variation of parameters $\alpha > 0$, $\alpha \approx 0$, $\alpha < 0$ and the ductility $\mu = \mu_h$ and $\mu > \mu_h$ for one main direction.

Tabela 2. Generisane pushover površi u funkciji varijacije parametara μ , μ_h i α za jedan glavni pravac
 Table 2. Pushover surfaces generated as a function of variation of parameters μ , μ_h and α for one main direction

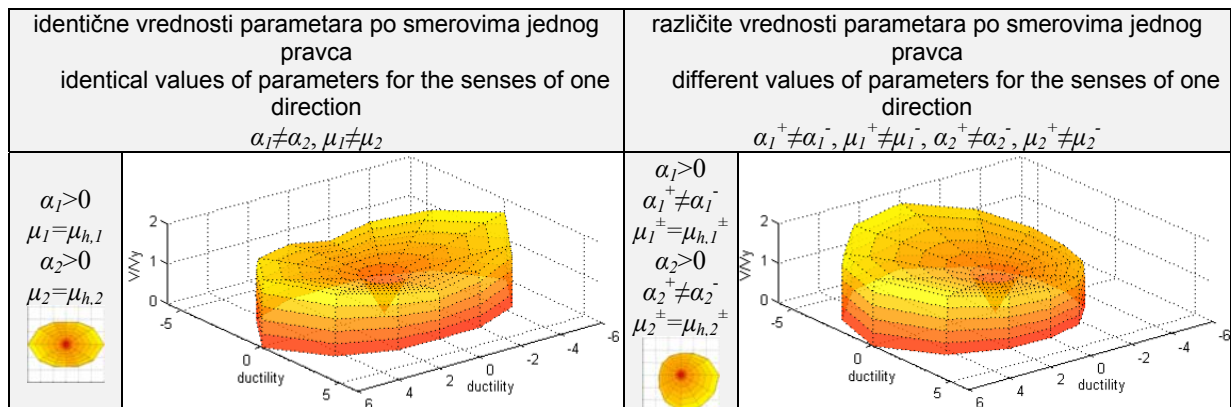
identične vrednosti parametara po smerovima jednog (svih) pravca identical values of parameters for the senses of one (all) direction $\alpha = \text{const.}, \mu = \text{const.}$		različite vrednosti parametara po smerovima jednog pravca different values of parameters for the senses of one direction $\alpha^+ \neq \alpha^-, \mu^+ \neq \mu^-$	
$\alpha > 0$ $\mu = \mu_h$ 		$\alpha^+ > 0$ $\mu^+ = \mu_h^+$ $\alpha^- > 0$ $\mu^- = \mu_h^-$ 	
$\alpha \approx 0$ $\mu = \mu_h$ 		$\alpha^+ \approx 0$ $\mu^+ = \mu_h^+$ $\alpha^- \neq 0$ $\mu^- = \mu_h^-$ 	

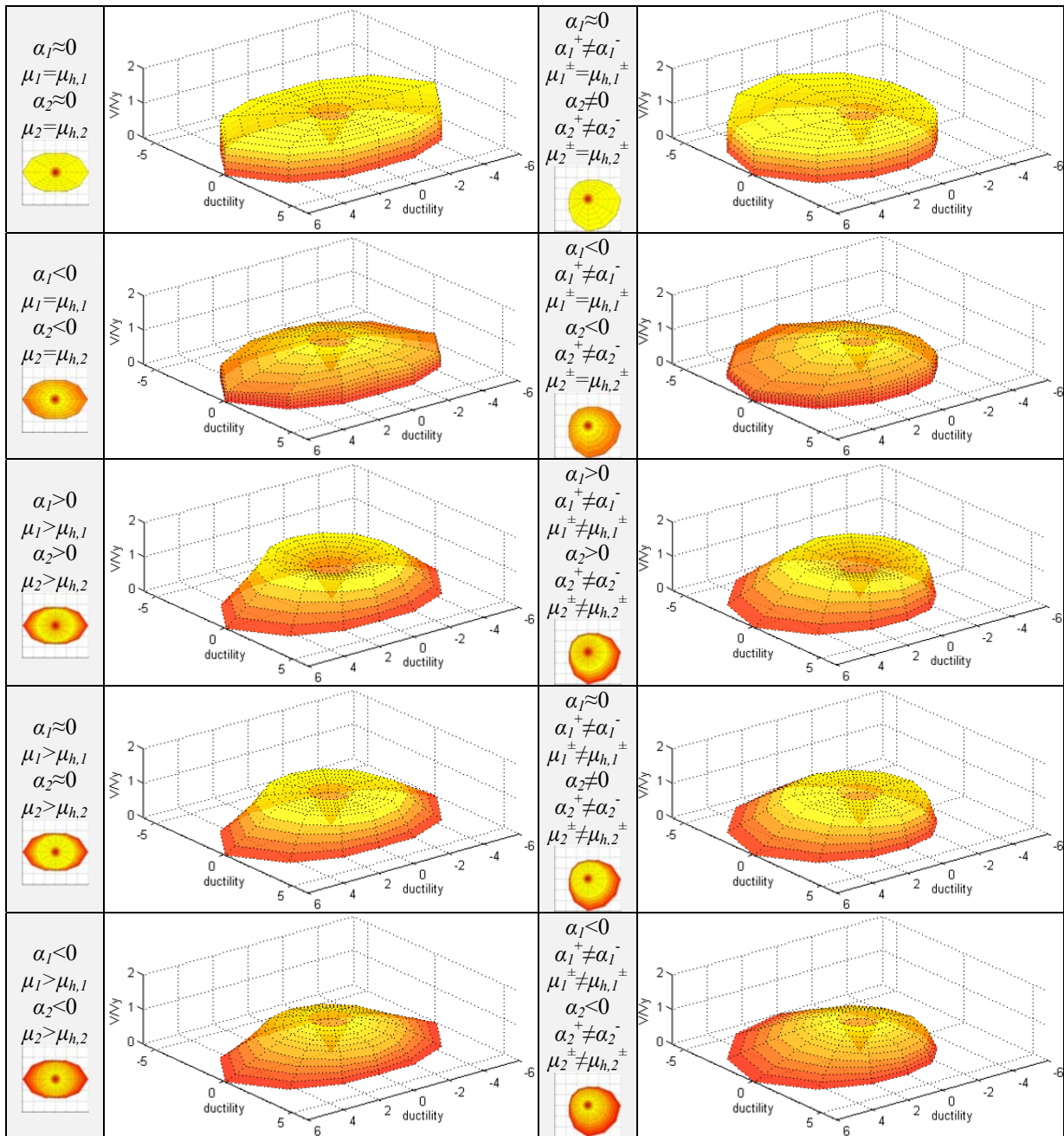


U slučaju varijacije parametara $\alpha > 0$, $\alpha \approx 0$, $\alpha < 0$ i duktilnosti $\mu = \mu_h$ i $\mu > \mu_h$ kod *pushover* površi za dva glavna pravca, razmatrani su slučajevi: identični parametri po smerovima jednog pravca i različiti parametri po smerovima jednog pravca. U tabeli 3 su prikazane generisane *pushover* površi u funkciji varijacije parametara μ , μ_h i α za dva glavna pravca.

In the case of variation of parameters $\alpha > 0$, $\alpha \approx 0$, $\alpha < 0$ and ductility $\mu = \mu_h$ and $\mu > \mu_h$ of the *pushover* surface in the two main directions, the following cases have been considered: identical parameters along the senses of one direction and different parameters along the senses of one direction. Table 3 shows the generated *pushover* surfaces as a function of variation of parameters μ , μ_h and α in the two main directions.

Tabela 3. Generisane *pushover* površi u funkciji varijacije parametara μ , μ_h i α za dva glavna pravca
 Table 3. Generated *pushover* surfaces as a function of variation of parameters μ , μ_h and α for the two main directions





Komparacijom generisanih *pushover* površi, prikazanih u tabelama 2 i 3, mogu da se identifikuju četiri bitno različite grupe tih površi. U prvu grupu svrstavaju se *pushover* površi rotaciono polisimetrične u osnovi (leva strana tabele 2), gde su sve *pushover* krive identične, a splajnovi u tangencijalnom pravcu su koncentrični krugovi s centrom u vertikalnoj osi:

By comparing the generated *pushover* surfaces shown in Tables 2 and 3, four distinctly different groups of surfaces may be identified. The first group includes *pushover* surfaces rotationally poly-symmetric at their base (left side of Table 2), where all *pushover* curves are identical, and splines in tangential direction are the concentric circles with the center along the vertical axis:

$$\left(V/V_y\right)_{\theta 1, \max} = \left(V/V_y\right)_{\theta 2, \max} = \dots = \left(V/V_y\right)_{\theta, \max} = \dots = \left(V/V_y\right)_{\theta n, \max}, \quad (26)$$

$$\mu_x^2 + \mu_y^2 = \mu_{\max}^2, \quad (27)$$

$$\mu_y = \pm \sqrt{\mu_{\max}^2 - \mu_x^2}, \quad \mu_x \in [-\mu_{\max}, \mu_{\max}], \quad (28)$$

gde je μ_{max} maksimalna realizovana duktilnost. Posledica ovog pravila jeste to što su svi splajnovi u tangencijalnom pravcu paralelni:

$$\left(V/V_y \right)_{j=1} = g(\mu_{x,j=1}, \mu_{y,j=1}) \parallel \dots \parallel \left(V/V_y \right)_{j=n} = g(\mu_{x,j=n}, \mu_{y,j=n}). \quad (29)$$

U drugu grupu svrstavaju se *pushover* površi koje su monosimetrične u osnovi (desna strana tabele 2) i za koje linija u osnovi može da se prikaže kao zatvorena ovalna kriva [9]. Izraz za zatvorenu ovalnu krivu dodatno je korigovan i prilagođen za potrebe ovog istraživanja, tako da glasi:

$$\left(\mu_x^2 + p^2 \mu_y^2 \right)^2 = \left(\mu_{x,max} + |\mu_{x,min}| \right) \mu_x^2 + 2 \left(\mu_{x,max} + |\mu_{x,min}| \right) p^2 \mu_x \mu_y^2, \quad (30)$$

$$\mu_y = \pm \frac{\sqrt{\mu_x \left(\mu_{x,max} + |\mu_{x,min}| - \mu_x + \sqrt{\left(\mu_{x,max} + |\mu_{x,min}| \right) \left(\mu_{x,max} + |\mu_{x,min}| - \mu_x \right)} \right)}}{p}, \dots \mu_x \in \left[\mu_{x,min}, \mu_{x,max} \right], \quad (31)$$

gde je $\mu_{x,max}$ maksimalna realizovana duktilnost za x pravac, $\mu_{x,min}$ minimalna realizovana duktilnost za x pravac, a p parametar ovalne krive. Treću grupu čine *pushover* površi koje su bisimetrične u osnovi (leva strana tabele 3) i za koje linija u osnovi može da se prikaže kao superelipsa [9]. Izraz za superelipsu dodatno je korigovan i prilagođen za potrebe ovog istraživanja, tako da glasi:

$$\left(\frac{\mu_x}{\mu_{x,max}} \right)^n + \left(\frac{\mu_y}{\mu_{y,max}} \right)^n = 1, \quad (32)$$

$$\mu_y = \pm \mu_{y,max} \sqrt[1 - \left(\frac{\mu_x}{\mu_{x,max}} \right)^n]{}, \quad \mu_x \in \left[-\mu_{x,max}, \mu_{x,max} \right], \quad (33)$$

gde je $\mu_{y,max}$ maksimalna realizovana duktilnost za y pravac, dok je n parametar superelipse. U četvrtu grupu svrstavaju se *pushover* površi koje su asimetrične ili monosimetrične u osnovi (desna strana tabele 3) i za koje linija u osnovi može da se prikaže takođe kao zatvorena ovalna kriva. U odnosu na izraz (30), dodatno je sprovedena korekcija, tako da sada taj izraz glasi:

$$\mu_{x,r} = \mu_{x,0} + \mu_x \cos \varphi - \mu_y \sin \varphi, \quad \mu_{y,r} = \mu_{y,0} + \mu_x \sin \varphi + \mu_y \cos \varphi, \quad (34)$$

gde su: μ_x i μ_y duktilnosti prema izrazu (30), $\mu_{x,0}$ i $\mu_{y,0}$ duktilnosti za centar zatvorene ovalne krive, a φ je ugao rotacije zatvorene ovalne krive. U tabeli 4 prikazana su četiri karakteristična tipa *pushover* površi i konstruisane odgovarajuće krive u osnovi.

Specijalni slučaj *pushover* površi javlja se kada se primeni adaptivna NSAPA-DBA (*displacement based analysis*) analiza sa identičnim maksimalnim realizovanim pomeranjima po svim *pushover* krivama kod 3D modela zgrada:

$$DR_{\theta_{1,max}} = DR_{\theta_{2,max}} = \dots = DR_{\theta_{n,max}} = \dots = DR_{\theta_{n,max}}. \quad (35)$$

where μ_{max} is maximum realized ductility. The consequence of this rule is that all the splines in the tangential direction are parallel:

The second group includes pushover surfaces which are mono-symmetric at their base (right side of Table 2) and for which the function of the closed oval curve may be used to represent their base [9]. The function of the closed oval curve is additionally corrected and adopted for this research, so the final form of this function is:

where $\mu_{x,max}$ is maximum realized ductility for x direction, $\mu_{x,min}$ is minimum realized ductility for x direction, and p parameter of the oval curve. The third group represents the pushover surfaces which are bi-symmetric at their base (left side of Table 3) and for which the function of the superellipse may be used to represent their base [9]. The function of the superellipse is additionally corrected and adopted for this research, so the final form of this function is:

where $\mu_{y,max}$ is maximum realized ductility for y direction, while n is parameter of the superellipse. The fourth group includes pushover surfaces which are asymmetric or monosymmetric in their base (right side of Table 3) and for which the closed oval curve may be used to represent their base. Additional corrections were done for equation (30), so the expression is now:

where μ_x and μ_y are ductilities according to (30), $\mu_{x,0}$ and $\mu_{y,0}$ ductilities for the center of closed oval curve, while φ is the angle of rotation of the closed oval curve. Table 4 shows the four distinctly different groups of pushover surfaces and corresponding curves at their base.

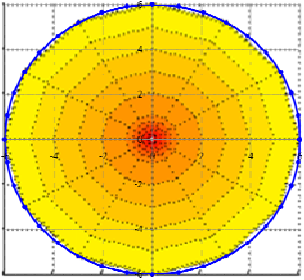
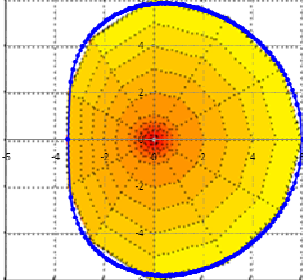
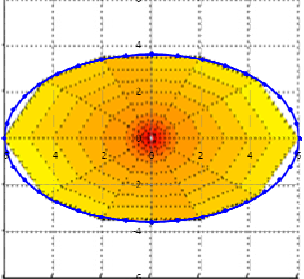
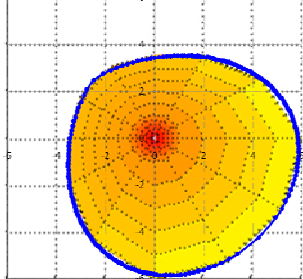
Special case of the pushover surface occurs when applying adaptive NSAPA-DBA analysis (*displacement based analysis*) with the identical maximum achieved displacements for all pushover curves in a 3D model of a building:

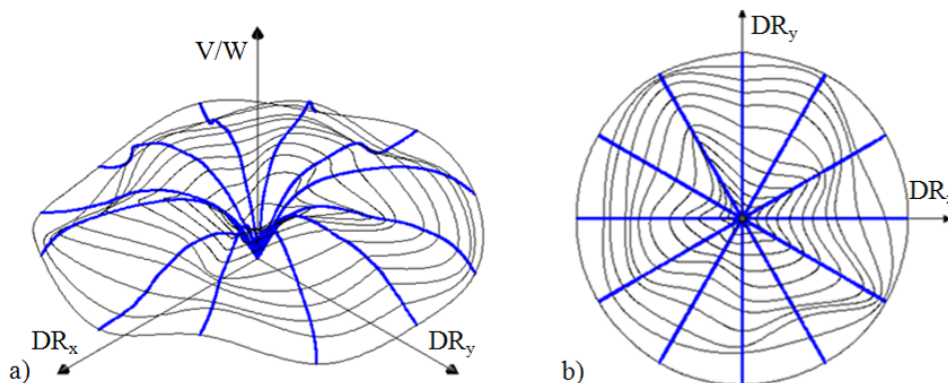
Tada *pushover* površ ima izgled prikazan na slici 15. Splajn u tangencijalnom pravcu za maksimalna realizovana pomeranja u ortogonalnoj projekciji DR_x - DR_y jeste krug (slika 15b), dok unutrašnji splajnovi u tangencijalnom pravcu ne moraju biti koncentrični krugovi. Iako su realizovana identična maksimalna pomeranja po svim *pushover* krivama, odgovarajuće vrednosti V/W nisu identične:

$$(V/W)_{\theta_{1,max}} \neq (V/W)_{\theta_{2,max}} \neq \dots \neq (V/W)_{\theta_{i,max}} \neq \dots \neq (V/W)_{\theta_{n,max}} \quad (35)$$

Then the *pushover* surface looks like the one shown in Figure 15. Spline in the tangential direction for the maximum achieved displacements in the orthogonal projection DR_x - DR_y is the circle (Figure 15b), while the internal splines in the tangential direction are not concentric circles. Even though the maximum realized displacements are identical along all *pushover* curves, the corresponding values of V/W are not identical:

Tabela 4. Četiri karakteristična tipa *pushover* površi i konstruisane odgovarajuće krive u osnovi
Table 4. Four characteristic types of *pushover* surfaces and adequate curves at their base

$\mu_{max}=6$		$\mu_{x,max}=6$ $\mu_{x,min}=-3.5$ $p=1.3$	
$\mu_{x,max}=6$ $\mu_{y,min}=-3.5$ $n=2$		$\mu_{x,max}=6$ $\mu_{x,min}=-3.5$ $p=1.65$ $\mu_{x\theta}=1.75$ $\mu_{y\theta}=-1.75$ $\varphi=135^\circ$	



Slika 15. *Pushover* površ za slučaj da su maksimalna realizovana pomeranja identična po svim *pushover* krivama: a) izometrija; b) DR_x - DR_y ravan
Figure 15. *Pushover* surface in the case when the maximum realized displacements are identical for all *pushover* curves: a) isometry, b) DR_x - DR_y plane

4 ZAKLJUČAK

Analiza seizmičkog odgovora konstrukcija primenom *pushover* površi predstavlja originalno razvijeno rešenje autora ovog rada. Primenom *pushover* površi moguće je znatno kompleksnije i kompletnije razmotriti odgovor i performanse 3D modela konstrukcija, posebno u slučaju izražene nesimetrije mase i krutosti, izloženih bidirekcionom seizmičkom dejstvu. Postavka od koje se pošlo u razvoju matematičke formulacije i generisanju *pushover* površi jeste primena *pushover* krive za odgovor sistema u jednom pravcu. Integracijom odgovora sistema za veći broj pravaca, odnosno uglova dejstva, prikazuje se 3D odgovor sistema u kapacitativnom domenu. U postupku generisanja 3D modela *pushover* površi polazi se od transformacije iz 2D ravanskog u 2D polarni koordinatni system, a zatim u 3D cilindrični koordinatni system, pa u 3D ortogonalni koordinatni sistem. Tipologija *pushover* krivih izvedena je u funkciji egzistencije linearnog, nelinearnog i kolapsnog subdomena, a takođe razmatranja su izvedena u funkciji nelinearne krutosti i klase duktilnosti sistema. Tipologija *pushover* površi izvedena je bazirajući se na generalizovanom modelu odgovora sistema preko parametara μ , μ_h i α , a na osnovu kojih je moguće formirati sisteme različite krutosti, nosivosti i duktilnosti. U slučaju varijacije parametara μ , μ_h i α kod *pushover* površi za jedan glavni pravac, razmatrani su slučajevi: identični parametri po smerovima jednog (svih) pravca i različiti parametri po smerovima jednog pravca. U slučaju varijacije parametara $\alpha > 0$, $\alpha \approx 0$, $\alpha < 0$ i duktilnost $\mu = \mu_h$ i $\mu > \mu_h$ kod *pushover* površi za dva glavna pravca, razmatrani su slučajevi: identični parametri po smerovima jednog pravca i različiti parametri po smerovima jednog pravca. Komparacijom generisanih *pushover* površi identifikovane su četiri bitno različite grupe kod kojih je osnova definisana primenom četiri matematičke funkcije. Istraživanje prikazano u ovom radu predstavlja tipološke modele *pushover* površi na osnovu kojih je dalje moguće da se vrše razmatranja na realnim *pushover* površima 3D modela konstrukcija s kompleksnijom varijacijom odgovora sistema pri bidirekcionom dejstvu zemljotresa.

ZAHVALNOST

Drugi autor (S. Brčić) izražava svoju zahvalnost Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansijsku podršku u okviru projekta TP 36043.

4 CONCLUSION

Analysis of the seismic response of structures using the pushover surface represents an original solution developed by the authors of this paper. By applying pushover surface it is possible to consider the response and performance of 3D models of structures in a more complex and complete way, especially in the case of emphasized non-symmetry of mass and stiffness, when exposed to bidirectional seismic action. The base setting from which the development of the mathematical formulation and generation of pushover surface started is the application of the pushover curve for the response of the system in one direction. By integrating the response of the system for a number of directions, or attack angles, the 3D system response in a capacity domain is presented. In the process of generating 3D model of the pushover surface one starts from the transformation of 2D plane to 2D polar coordinate system and then into the 3D cylindrical coordinate system and finally into the 3D orthogonal coordinate system. The typology of pushover curve is derived as a function of existence of the linear, nonlinear and collapse subdomains, and also considerations are made taking into account the nonlinear stiffness and ductility class of the system. The typology of pushover surface is derived according to the generalized model of the system's response through parameters μ , μ_h and α , based on which it is possible to create systems of different stiffness, strength and ductility. In the case of variations of parameters μ , μ_h and α of the pushover surface for one main direction, the following cases are considered: identical parameters along the senses of one (all) direction and different parameters along the senses of one direction. In the case of variation of parameters $\alpha > 0$, $\alpha \approx 0$, $\alpha < 0$ and ductility $\mu = \mu_h$ and $\mu > \mu_h$ of the pushover surface for two main directions, the following cases have been discussed: identical parameters for both senses of one direction and different parameters for the senses of one direction. By comparing the generated pushover surfaces, four significantly different groups have been identified, in which the base was expressed by using four mathematical functions. The research presented in this paper defines typological models of pushover surfaces according to which the further analysis can be done on the real pushover surfaces of 3D models of structures with more complex variation of responses of the system during bidirectional earthquake actions.

ACKNOWLEDGEMENT

The second author (S. Brčić) is grateful for the financial support from the Ministry of education, science and technological development of the Republic of Serbia, within the framework of the Project TP 36043.

5 LITERATURA REFERENCES

- [1] Ast L., Hatzigeorgiou G., Ang L.: *Efekat višestrukih zemljotresa na seizmički odgovor konstrukcije*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 55, No. 4, 2012, str. 3–14.
- [2] Ćosić M.: *Analiza odnosa zahteva i odgovora sistema za procenu performansi u uslovima seizmičkog dejstva*, Zbornik radova Građevinsko-arhitektonskog fakulteta, Br. 25, Niš, Srbija, 2010, str. 41–48.
- [3] Ćosić M.: *Nelinearna statička seizmička analiza višespratnih okvira*, magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2010, 230 str.
- [4] Ćosić M., Brčić S.: *Pushover Surface and Target Displacement Envelope: 3D Performance-Based Seismic Response of Structures*, 2013, (in a process of publishing)
- [5] Dražić J.: *Konceptualno projektovanje aseizmičke konstrukcije – vrednovanje projektnih rešenja*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 52, No. 3-4, 2009, str. 21–34.
- [6] Eurocode 8, *Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium, 2004, 229 p.
- [7] Gopčević Š., Brčić S., Žugić Lj.: *Dinamičke osobine i vremenski odgovor okvirnih nosača sa polukrutim ekscentričnim vezama*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 9, No. 3, 2011, str. 379–393.
- [8] Gray A., Abbena E., Salamon S.: *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica*, CRC Press, 2006, 984p.
- [9] Hazewinkel M. (Ed.): *Encyclopedia of Mathematics*, Vol. 1–10, Springer, 1987–1994.
- [10] HAZUS-MH MR1, *Advanced Engineering Building Module, Multi-Hazard Loss Estimation Methodology*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., USA, 2003, 119 p.
- [11] Jeong S-H., Elnashai A.: *Analytical Assessment of an Irregular RC Full Scale 3D Test Structure*, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 2004, 141 p.
- [12] Jeong S., Elnashai A.: *Analytical and Experimental Seismic Assessment of Irregular RC Buildings*, The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 113, Vancouver, Canada, 2004, pp. 1–15.
- [13] Jeong S-H., Elnashai A.: *Analytical Assessment of an Irregular RC Frame for Full Scale 3D Pseudo-Dynamic Testing, Part I: Analytical Model Verification*, Journal of Earthquake Engineering Vol. 9, No. 1, 2005, pp. 95–128.
- [14] Kappos A., Panagopoulos G.: *Performance-Based Seismic Design of 3D R/C Buildings Using Inelastic Static and Dynamic Analysis Procedures*, Journal of Earthquake Technology, ISET, Paper No. 444, Vol. 41, Iss. 1, 2004, pp. 141–158.
- [15] Lađinović Đ., Folić R.: *Analiza konstrukcija zgrada na zemljotresna dejstva*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 47, No. 3-4, 2004, str. 31–64.
- [16] Lađinović Đ.: *Savremene metode seizmičke analize konstrukcija zgrada*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 51, No. 2, 2008, str. 25–39.
- [17] MATLAB, URL: <http://www.mathworks.com>
- [18] Papanikolaou V., Elnashai A.: *Evaluation of Conventional and Adaptive Pushover Analysis, I: Methodology*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 9, No. 6, 2005, pp. 923–941.
- [19] Pinho R., Bento R., Bhatt C.: *Assessing the 3D Irregular Spear Building with Nonlinear Static Procedures*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 158, Beijing, China, 2008, pp. 1–8.
- [20] Prautzsch H., Boehm W., Paluszny M.: *Bezier and B-Spline Techniques*, Springer, 2002, 304 p.
- [21] Reyes J., Chopra A.: *Modal Pushover-Based Scaling of Two Components of Ground Motion Records for Nonlinear RHA of Buildings*, SEAOC Convention, Indian Wells, USA, 2010, pp. 1–28.
- [22] Reyes J., Chopra A.: *Three-Dimensional Modal Pushover Analysis of Buildings Subjected to Two Components of Ground Motion, Including Its Evaluation for Tall Buildings*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Vol. 40, No. 7, 2011, pp. 789–806.
- [23] Reyes J., Chopra A.: *Evaluation of Three-Dimensional Modal Pushover Analysis for Unsymmetric-Plan Buildings Subjected to Two Components of Ground Motion*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Vol. 40, No. 13, 2011, pp. 1475–1494.
- [24] Reyes J., Kalkan E.: *Significance of Rotating Ground Motions on Nonlinear Behavior of Symmetric and Asymmetric Buildings in Near Fault Sites*, 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 2012, pp. 1–10.
- [25] Reyes J., Kalkan E.: *Should Ground-motion Records be Rotated to Fault-Normal/Parallel or Maximum Direction for Response History Analysis of Buildings?*, U.S. Geological Survey Report, 2012, 80 p.
- [26] Vukašinović V., Simonović G.: *Nelinearna statička analiza po preporukama FEME 273, 274, 356, 440 i 450 i njena praktična primjena uz pomoć kompjuterskog software-a SAP2000*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 50, No. 1-2, 2007, str. 20–38.
- [27] Vukašinović V., Simonović G.: *Unapređenja nelinearne statičke seizmičke analize koje promoviraju FEMA 440*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 50, No. 3, 2007, str. 31–40.
- [28] Žugić Lj., Brčić S.: *Vremenski odgovor nesimetrične zgrade u zavisnosti od dominantnog pravca djelovanja zemljotresa*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 53, No. 1, 2010, str. 14–32.
- [29] Žugić Lj., Brčić S.: *Sudar susjednih nesimetričnih višespratnih zgrada usled uticaja zemljotresa*, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 53, No. 2, 2010, str. 3–22.

REZIME

TIPOLOGIJA NSPA PUSHOVER KRIVIH I POVRŠI ZA 3D SEIZMIČKI ODGOVOR KONSTRUKCIJA PREMA PERFORMANSAMA

Mladen ĆOSIĆ
Stanko BRČIĆ

U radu je prikazana tipologija *pushover* krivih (*pushover curves*) i originalno razvijenih *pushover* površi (*pushover surfaces*), na osnovu generalizacije nelinearnog odgovora 3D sistema na seizmičku pobudu. Određivanjem i analizom NSPA (*Nonlinear Static Pushover Analysis*) *pushover* površi moguće je znatno kompleksnije i kompletnije razmotriti odgovor i performanse 3D modela konstrukcija izloženih bidirekcionom seizmičkom dejstvu. Osnovna postavka od koje se pošlo u razvoju matematičke formulacije i generisanju NSPA *pushover* površi jeste primena NSPA *pushover* krive za odgovor sistema u jednom pravcu. Integracijom odgovora sistema za veći broj pravaca, odnosno napadnih uglova pravaca dejstva zemljotresa, prikazuje se 3D odgovor sistema u kapacitativnom domenu. Tipologija NSPA *pushover* krivih izvedena je u funkciji egzistencije linearnog, nelinearnog i kolapsnog subdomena, a takođe su izvedena razmatranja u funkciji nelinearne krutosti i klase duktilnosti sistema. Tipologija NSPA *pushover* površi izvedena je bazirajući se na generalizovanom modelu odgovora sistema preko duktilnosti, duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja i koeficijenta odnosa nelinearne/linearne krutosti, a na osnovu čega je moguće formirati sisteme različite krutosti, nosivosti i duktilnosti. Istraživanje prikazano u ovom radu definiše tipološke modele NSPA *pushover* površi na osnovu kojih je dalje moguće vršiti razmatranja na realnim *pushover* površima 3D modela konstrukcija s kompleksnijom, a posebno nesimetričnom geometrijom, kao i varijacijom odgovora sistema pri bidirekcionom dejstvu zemljotresa.

Ključne reči: NSPA *pushover* krive i površi, tipologija, 3D performance, zemljotres

SUMMARY

TIPOLOGY OF NSPA PUSHOVER CURVES AND SURFACES FOR 3D PERFORMANCE-BASED SEISMIC RESPONSE OF STRUCTURES

Mladen ĆOSIĆ
Stanko BRČIĆ

This paper presents a typology of pushover curves and the originally developed pushover surfaces based on the generalization of the nonlinear response of the 3D system to the earthquake action. By determination and analysis of the NSPA (*Nonlinear Static Pushover Analysis*) pushover surface, it is possible to obtain a more complex and complete insight of the response and performance of 3D models of structures exposed to the bidirectional seismic action. The setting which was a base for the development of mathematical formulation and generation of the NSPA pushover surface presents the application of NSPA pushover curve for the response of the system in one direction. By integrating the system responses for a number of directions, i.e. attack angles of directions of earthquake action, the presentation of 3D response of the system in the capacity domain is achieved. The typology of NSPA pushover curves is derived as a function of the existence of linear, nonlinear and collapse sub domain, and also considerations are made taking into account the nonlinear stiffness and ductility class of the system. The typology of NSPA pushover surface is derived based on the generalized model of the system response through ductility, ductility in hardening/softening zone and a coefficient of the relationship of stiffness in the nonlinear and linear domain, based on which it is possible to create systems of different stiffness, strength and ductility. The research presented in this paper defines the typological models of NSPA pushover surfaces which can be the base of further discussion on real pushover surfaces of 3D models of structures with a more complex, particularly non-symmetric geometry, as well as the variation of responses of the system due to bidirectional seismic actions.

Key words: NSPA pushover curves and surfaces, typology, 3D performance, earthquake

MOGUĆNOSTI POBOLJŠANJA PLANUMA ŽELEZNIČKE PRUGE

IMPROVEMENT ALTERNATIVES FOR RAILWAY TRACK FORMATION

Mirjana TOMIČIĆ-TORLAKOVIĆ

STRUČNI RAD
PROFESSIONAL PAPER¹
UDK: 625.113
ID: 204280588

1 UVOD

Kolosek treba razmatrati kao jedinstveni sistem. Svaki pojedini element tog sistema, počevši od šine i praga, preko zastora ili čvrste podloge (beton/asfalt), do zaštitnog sloja planuma, mora da obezbedi dugotrajnu stabilnost koloseka, zahtevajući pritom malo održavanja čak i pri velikim gustinama saobraćaja, povećanim brzinama i osovinskim opterećenjima.

Planum koloseka je površina na kojoj se gradi kolosek. Njegova glavna funkcija je da bude stabilna podloga za podzastorne i zastorne slojeve. On je veoma važna komponenta donjeg stroja, koja ima značajan uticaj na karakteristike i održavanje koloseka. Doprinosi elastičnosti oslanjanja gornjeg stroja i otuda elastičnom ugibu šine pod opterećanjem točka. Veličina krutosti planuma utiče na propadanje šine, praga i zastora, a takođe je uzrok nejednakog sleganja koloseka.

Slika 1 [5], [7], [10] pokazuje uobičajene termine za pojedine delove konstrukcije pruge.

Osnovni zahtevi za planum pruge jesu:

- ravnost i projektovani nagib gornje površine;
- izdržljivost na oštećenja;
- nosivost i sposobnost prenosa opterećenja od gornjeg stroja;
- stabilnost na zamrzavanje;
- filterska stabilnost.

Prof. dr Mirjana Tomičić-Torlaković, Univerzitet u Beogradu
- Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73,
Beograd, Srbija

1 INTRODUCTION

The track has to be regarded as an inherent system. Each individual element of that system, beginning from rail and sleeper, via the ballast or solid bed (concrete/asphalt), down to the formation protection layer, must provide long-term track stability requiring low maintenance even at high train density, increasing running speeds and axle loads.

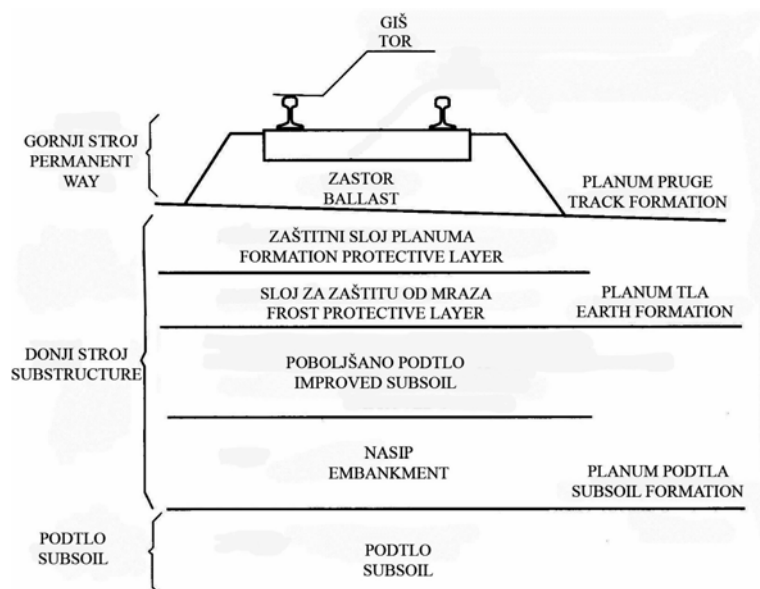
The track formation is the platform upon which the track superstructure is constructed. Its main function is to be a stable foundation for the subballast and ballast layers. It is a very important substructure component, which has a significant influence on track performance and maintenance. It contributes to the superstructure support resiliency and hence to the elastic deflection of the rail under wheel loading. The formation stiffness magnitude influences rail, sleeper and ballast deterioration and also is a source of track differential settlement.

Figure 1 [5], [7], [10] shows the usual terms of individual parts of railway structure.

The main requirements for track formation are:

- Evenness and designed slope of surface;
- Resistance to wear;
- Bearing and transmit the loading from the superstructure;
- Stability from freezing;
- Filter stability.

Professor Mirjana Tomicic-Torlakovic, Ph.D.,
University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Belgrade, Serbia



Slika 1. Definisane termina konstrukcije pruge
Figure 1. Definition of track structure terminology

Da bi planum ispunio te zahteve i služio kao stabilna osnova, moraju se izbeći sledeći oblici njegovog propadanja planuma moraju biti izbegnuti:

- prekomerna plastična deformacija;
- konsolidacija i veliki gubitak otpornosti na smicanje;
- ubrzani gubitak otpornosti na smicanje pod ponavljanim opterećenjem od točkova;
- značajna promena zapremine (bubrenja i skupljanja) od promene vlažnosti;
- omekšavanje usled zamrzavanja i odmrzavanja pri dejstvu mraza;
- osipanje planuma.

2 NOSIVOST PLANUMA

Odlučujuća veličina u međusobnoj povezanosti gornjeg i donjeg stroja pruge jeste sposobnost nosivosti planuma.

Nedovoljna nosivost planuma uglavnom je izazvana:

- lošom ili nedostajućom drenažom;
- sprečenim oticanjem vode s ramena zastorne prizme;
- udubljenjima u zaprljanom zastoru usled nedovoljnog čišćenja.

Uzroci nestabilnosti koloseka najčešće su baš deformacije planuma, a one se prepoznaju po sledećim vidnim znacima [8], [10]:

- stalna i ponovna pojavljivanja grešaka geometrije koloseka;
- blatnjava mesta na površini zastora izazvana prskanjem blata uvis za vreme prolaska vozova ("pumpanje");
- bočno istiskivanje razmekšalog podtla, najčešće kod preopterećenog glinovitog podtla;
- sleganje koloseka usled deformisanja planuma tla u vidu "džepova", "korita" ili "vreača" u kojima se skuplja voda;

To fulfill these requirements and to serve as a stable platform, the following formation failure modes must be avoided:

- Excessive plastic deformation;
- Consolidation settlement and massive shear failure;
- Progressive shear failure from repeated wheel loading;
- Significant volume change (swelling and shrinking) from moisture change;
- Frost and thaw softening;
- Formation attrition.

2 TRACK FORMATION BEARING CAPACITY

The decisive element in the connection between track superstructure and substructure is the bearing capacity of the track formation.

Insufficient bearing capacity of the formation is mostly caused by:

- Poor or lacking drainage;
- Prevented water flow off the ballast shoulders;
- Hollows in contaminated ballast due to insufficient cleaning.

The following phenomenons of formation deformations indicate the defects of the substructure [8], [10]:

- Permanent and recurrent irregularities of track geometry;
- Muddy spots due to subsoil material pumping up into ballast during train passing;
- Side squeezing out the wet soil (mostly clay);
- Track settlements due to formation deformation in forms of ballast pockets and troughs full of water;
- Raising the track due to substructure freezing;
- Shoulders settlements due to embankment shearing and shelling;
- Shoulders cracks as a result of embankment settlements;

- izdizanje koloseka od zamrzavanja u donjem stroju;
- sleganje bankina usled klizanja ili školjkanja nasipa;
- pukotine na bankinama kao posledica sleganja nasipa;

- masivno smicanje planuma za vreme velikih kiša.

Planum verovatno ima najveći uticaj na krutost oslanjanja koloseka, a njegov modul deformacije varira duž pruge. Modul deformacije planuma E_{v2} može se odrediti opitom statičkog pritiska pločom. S, obzirom na prirodu opterećenja vozom, merodavniji je dinamički pritisak ploče, kada se određuje dinamički modul deformacije E_{din} . Pritom kratkovremensko udarno opterećenje nanosi se na planum, čime se on pobuđuje na prigušeno oscilovanje. Što su ugibi veći, pri čemu su i amplitude prigušenih sopstvenih oscilacija veće, to planum ima manju nosivost.

Kapacitet nosivosti planuma zavisi od:

- vlažnosti i suve gustine;
- plastičnog ponašanja;
- prirode veze napon-deformacija.

Pesak i šljunak zbijaju se vrlo lako i otuda imaju visoki kapacitet nosivosti. Kohezivna tla, kao što su prašina i glina, obično imaju vrlo nizak kapacitet nosivosti, što umnogome zavisi od sadržaja vode. Njihov kapacitet nosivosti je veći u uslovima isušenosti i očvršćavanja, a opada s povećanjem sadržaja vode, idući ka plastičnom stanju, sve do fluidnog.

Tabela 1 [5] pokazuje zahteve za pojedine slojeve donjeg stroja po modulima deformacije i zbijenosti za slučaj koloseka u zastoru i na čvrstoj podlozi, a za razne vrste pruga.

- Massive formation shearing during raining.

Track formation probable has the greatest influence on the superstructure support resiliency and its modulus of deformation varies along the track. Modulus of deformation E_{v2} can be derived from the plate static load bearing test. Taking the nature of train load into consideration, the modulus of dynamic deformation E_{din} is more competent. By the dynamic plate test an impact load for the short term is applied to the formation, which induced it to vibrate in damped oscillations. If the settlement and amplitude of the oscillation are high, the bearing capacity of the formation is low.

The formation bearing capacity depends on:

- moisture content and dry density,
- plastic behaviour,
- stress/strain relationship.

Sand and gravel consolidated easily and from that have the high bearing capacity. Coherent soils, like dust and clay, have the very low bearing capacity and it largely depends on water content. Their bearing capacity is higher in dry and hard conditions and falls with the water content increase, striving to plastic state, even to liquid.

Table 1 [5] shows the requirements to be met by the substructure layers for the modulus of deformation and consolidation in the case of ballasted or solid track, and different line types.

Tabela 1. Zahtevi za donji stroj
Table 1. Substructure requirements

Vrste pruge Line type V [km/h]			Planum Formation [MN/m ²]		Zaštitni sloj Protective layer			Zemljani planum Earth formation [MN/m ²]		
			E_{v2}	E_{din}	D_{Pr}	Dubina zamrzavanja Standard thickness [cm]			E_{v2}	E_{din}
						I	II	III		
Novoizgrađene New track	pruge velikih brzina HST (300)	u zastoru ballast	120	50	1,0	70	70	70	80	40
		u čvrstoj podlozi slab	120	50	1,0	40	40	40	60	35
	putnički saobraćaj passenger traffic (230)	u zastoru ballast	120	50	1,0	50	60	70	60	40
		u čvrstoj podlozi slab	120	50	1,0	40	40	40	60	35
	putnički saobraćaj passenger traffic (160) mešoviti saobraćaj mixed traffic (160) teretni saobraćaj freight traffic (120) lokalni saobraćaj commuter traffic (120)	u zastoru ballast	100	45	1,0	40	50	60	45	35

	lokalni saobraćaj commuter traffic (80) teretni saobraćaj freight traffic (50)	u zastoru ballast	80	40	1,0	30	40	50	45	30
Obnovljene Renewal track	pruge velikih brzina HST (300)	u zastoru ballast	120	50	1,0	70	70	70	80	40
		u čvrstoj podlozi slab	120	50	1,0	40	40	40	60	35
	putnički saobraćaj passenger traffic (230)	u zastoru ballast	80	40	1,0	30	40	50	45	30
		u čvrstoj podlozi slab	100	45	1,0	40	40	40	45	30
	putnički saobraćaj passenger traffic (160) mešoviti saobraćaj mixed traffic (160) teretni saobraćaj freight traffic (120) lokalni saobraćaj commuter traffic (120)	u zastoru ballast	50	35	1,0	20	25	30	30	25
	lokalni saobraćaj commuter traffic (80) teretni saobraćaj freight traffic (50)	u zastoru ballast	40	30	0,97	20	20	20	20	25

E_{v2} – statički modul deformacije/modulus of static deformation

E_{din} – dinamički modul deformacije/modulus of dynamic deformation

D_{Pr} – zbijenost po Proktoru/Proctor density

3 ZBIJENOST PLANUMA

Pri ispitivanju zbijenosti po Proktoru uzorak materijala iz planuma zbija se u normiranoj čeličnoj posudi tegom koji pada pod utvrđenim uslovima, pri raznim sadržajima vode. Proktorova kriva pokazuje do kojeg se dozvoljenog sadržaja vode propisana zbijenost može postići. Zbijenost po Proktoru odgovara zbijenosti (radu na zbijanju od oko 60 t/m^3), koja može biti postignuta na mestu izgradnje pruge sa uobičajenom opremom za zbijanje. Ona se može definisati putem stepena zbijenosti, koji predstavlja odnos izmerene zapreminske mase u suvom stanju zbijenog tla i maksimalne zapreminske mase pri optimalnoj vlažnosti dobijene Proktorovim opitom:

$$D_{Pr} = \gamma_d / \max \gamma \times 100 \quad [\%]$$

3 TRACK FORMATION CONSOLIDATION

Compression test is the famous Proctor test where the formation material sample is compressed under predetermined conditions in a calibrated receptacle with help of the drop weight, under five different water content at least. The Proctor curve shows which admissible water content the prescribed compression value can be reached. The Proctor density corresponds to a compression (work done of approx. 60 t/m^3) that may be reached on the track's site with the help of the usual compression devices. It can be defined by means of compaction ratio, as the relation between the volume weight in dry condition and in the most favourable water content:

4 ODVODNJAVANJE PLANUMA

Poznato je da voda u planumu negativno utiče na održavanje pravilne geometrije koloseka, pa treba nastojati da se njeno prisustvo smanji:

- čišćenjem zastora;
- održavanjem propisanog bočnog nagiba planuma;
- čišćenjem bočnih jarkova i drenaža;
- ako je potrebno, izradom kontrolnih i ventilacionih okana.

Postoje dva tipa odvodnjavanja: otvoreni i zatvoreni sistem odvodnjavanja.

Otvoreni sistem odvodnjavanja obično se sastoji od jarkova i kanala pored pruge u usecima, u koje se skuplja površinska voda. Širina jarkova u usecima obično je 0,4 m, a dubina ispod planuma 0,4 m. Širina kanala iznosi od 0,8 m do 1,6 m i dubina ispod planuma 0,2 m. Njihov podužni pad treba da je bar 0,3%, a najviše do 3%. U slučaju većeg ili manjeg podužnog pada, najbolje je koristiti prefabrikovane betonske kanale ili kanale zidane lomljenim kamenom, na peskovito-šljunkovitoj podlozi [8]. Prednost otvorenog sistema odvodnjavanja u odnosu na zatvoreni jeste to što je dostupniji i lakše se održava.

Zatvoreni sistem odvodnjavanja ugrađuje se tamo gde nivo podzemnih vode treba da se smanji (<1,5 m ispod gornje ivice šine), tlo oko pruge treba da se odvodnjava i filtrirana voda ili voda iz slojeva treba da se odvede. Kod zatvorenog sistema odvodnjavanja, za smanjenje nivoa podzemne vode koriste se porozne cevi, propusne sa svih strana. Delimično propusne cevi (samo s gornje strane) odvedu vodu koja se proceđuje bilo s površine, bilo iz slojeva konstrukcije. Podužni pad poroznih cevi mora da je bar 0,3%. One se polažu na najmanje 60 cm ispod planuma. Kanal za polaganje cevi mora biti ispunjen šljunkom. Okna za održavanje sistema za odvodnjavanje moraju da budu izrađena na 50–100 m, i ona se koriste za proveru i čišćenje cevi. Prednosti zatvorenog sistema odvodnjavanja nad otvorenim jesu u tome što je potreban manji minimalni pad i manji prostor, kao i to što ne zahteva reprofilisanje i uklanjanje korova.

S dobro projektovanim sistemom za odvodnjavanje moguće je postići efikasno odvodnjavanje i u nekim slučajevima čak odustati od obnove planuma.

5 POBOLJŠANJE PLANUMA

U slučaju kada je planum slabe nosivosti ili male krutosti, što uzrokuje veće troškove održavanja pruge kao celine, nameće se potreba za poboljšanjem stanja planuma. Poboljšanje planuma je skupa mera. U ekonomskim razmatranjima za razdoblje od trideset pet godina, imajući u vidu povećane troškove održavanja ako se poboljšanje ne sprovodi, prednost ove mere pokazuje se već posle deset godina.

Poboljšanje planuma treba da ispuni sledeće zahteve:

- ujednačeni modul elastičnosti duž cele dužine pruge od najmanje 4,5 kN/m², optimalno 12 kN/m²;
- postepeni pad modula elastičnosti sa dubinom, inače nastaje pumpanje blata;

4 TRACK FORMATION DRAINAGE

It is well-known that water contained in the formation has an adverse effect on the correct track geometry. Therefore, the following measures are applied to reduce the water content in the formation:

- cleaning the ballast,
- maintain the formation cross fall,
- cleaning of side ditches and drainage,
- if necessary, building up the inspection and ventilation shafts.

There are two types of drainage facilities: open drainage facilities and enclosed drainage facilities.

Open drainage system usually consists of the ditches and canals in track sides at embankment cuts in which the surface water should be led away. The ditches width in cuts is usually 0.4m and the depth below the formation is of 0.4m. The channel width is from 0.8m to 1.6m and the depth below the formation is of 0.2m. Their longitudinal inclination should be at least 0.3% and at most 3%. If the longitudinal inclination is below or above these values, precast concrete canals in a fine gravel bed or a coarse pavement of broken stone on fine gravel have to be provided. The advantage of open drainage systems as compared to closed systems is that they are always easily accessible and easy to maintain.

Enclosed underground drainage facilities are installed where the groundwater level has to be lowered (<1.5m below TOR), the soil surrounding the track has to be drained and percolating or layer water has to be led away. If the groundwater level has to be lowered or the soil has to be drained, the porous pipes, permeable all around, are advisable. Partial-permeable, only on their top, pipes are used to lead away percolating and layer water. The longitudinal inclination of percolating water pipes should be at least 0.3%. They are laid at the depth below the formation of at least 60cm. The pipe ditch has to be filled with gravel. Inspection pits enable the pipes to be checked and cleaned and they are provided at distances of 50-100m. The advantage of enclosed drainage systems against open systems is that their minimum inclination and the required space is less and there is no need for reprofiling and weeding.

If the drainage system is correct designed, it is possible to attain effective track draining and in some cases it would not be necessary to renew the formation.

5 FORMATION IMPROVEMENT

In cases when the track formation is too weak or has too low stiffness, that resulting in high cost of track maintenance, may dictate the need to improve the formation conditions. The track formation improvement is the expensive measure. At economic consideration in thirty five years time period, with taking into account the maintenance costs, the advantage of the measure is obvious already after ten years.

Formation measures should meet the following requirements:

- constant modulus of elasticity along the entire track length of at least 4,5 kN/cm², optimum 12 kN/cm²,
- gradual decrease of the modulus of elasticity with depth, otherwise mud would be pumped up,

- stvaranje toplotne izolacione brane;
- sprečavanje stvaranja vodene pare i – ukoliko se ipak pojavi – odvođenje vode nastale njenom kondenzacijom,
- mali troškovi ugradnje;
- smanjenje poremećaja saobraćaja pri izgradnji;
- trajanost preko dvadeset godina.

Mogućnosti poboljšanja planuma navedene su u tabeli 2 [9]. Postoji šest opštih grupa. Kako je za većinu metoda potrebno iskustvo, često i specijalna oprema, preporučljivo je konsultovati se sa stručnjacima.

- create the heat insulation barrier,
- preventing from vapour seal, if happens, draining off condensation water,
- low installation costs,
- reduction operational hindrance during installation,
- life time of more than twenty years.

The formation improvement alternatives are listed in Table 2 [9]. There are six general groups. As for the majority of these methods the experience is needed, often special equipment, it is advisable to consult with specialists.

Tabela 2. Mogućnosti poboljšanja planuma
Table 2. Formation improvement alternatives

<p>I Promene osobina planuma na terenu Altering formation properties in place</p> <p>A. Injektiranje Grouting</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Penetracija Penetration 2. Zbijanje Compaction <p>B. Injektiranje krečom pod pritiskom Lime slurry pressure injection</p> <p>C. Delovanje strujom Electrical treatment</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Elektro-osmoza Electro-osmosis 2. Elektrohemijska stabilizacija Electrochemical stabilization
<p>II Rekonstrukcija i zamena Reconstruction and replacement</p> <p>A. Zbijanje Compaction</p> <p>B. Zamena Replacement</p> <p>C. Stabilizacija dodacima Admixture stabilization</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cement Cement 2. Kreč Lime 3. Bitumen Bitumen
<p>III Primena asfalt-betona Asphalt-concrete applications</p> <p>A. Na punoj dubini Full depth (replacing ballast and subballast)</p> <p>B. U zaštitnom sloju Underlayment (replacing subballast)</p>
<p>IV Stabilizacija klizišta Slip stabilization</p> <p>A. Odvodnjavanje Drainage</p> <p>B. Potporne konstrukcije Retaining structures</p> <p>C. Promena nagiba Slope change</p>
<p>V Ugradnja zaštitnog sloja Insertion of protective layer</p>
<p>VI Primena geosintetičkih proizvoda Geosintentic products implementation</p>

5.1 Promena osobina planuma na terenu

5.1.1 Injektiranje

Injektiranjem se ubrizgava materijal u tlo kako bi se ono ojačalo, izmenilo ili kako bi se smanjila njegova propustljivost.

Injektiranje penetracijom ojačava tlo povezujući čestice tla, odnosno zatvaranjem šupljina smanjuje se propustljivost, ili oba. Za uspešno injektiranje penetracijom, tlo mora biti relativno propustljivo. Smanjenje propustljivosti peska i šljunka u trupu pruge može se postići injektiranjem cementnim malterom, glinenim muljem u vodi, peskom i letećim pepelom. Čestice ovih sredstava prevelike su da bi popunile šupljine u mulju i glini, ili pesku i šljunku s više od 10% mulja i gline. Zbog toga, ova metoda nije poželjna u tlu koje sadrži mulj i glinu. Hemijska sredstva (najčešće silikati) za injektiranje mogu prodrati u grubi mulj i u srednji do fini pesak. Sposobnost sredstva za injektiranje da proдре u tlo procenjuje se na osnovu ispitivanja njegove propustljivosti na terenu ili u laboratorijskim uslovima, kao i analizom veličine zrna. Prema [9] predlaže se da D_{15} tla treba da bude bar 25 puta D_{85} čestica injekcionog sredstva. Takođe, potrebna je procena poboljšanja čvrstoće planuma.

Injektiranjem zbijanjem se zbija i/ili potiskuje okolno tlo pritiskom grudvom injekcionog materijala. Injekciono sredstvo je veoma konzistentna mešavina cementa, peska, pepela, gline i vode, koja se putem cevi do željene dubine pumpa pod pritiskom 700 –4000 kPa. Ovaj postupak je neprikladan za ojačanje natopljenog vezanog tla koje je nestišljivo, jer se može istisnuti tlo pod pritiskom sredstva za injektiranje u dubljim šupljinama.

5.1.2 Injektiranje krečom pod pritiskom

Krečni mulj utiskuje se kroz cevi pod pritiskom od 340 do 1700 Mpa i prodire u naprsline, pukotine, te propusne slojeve. Nedostatak je slaba kontrola rasprostiranja sredstva i opasnost od loma tla i formiranja novih pukotina. Otuda je potrebno ispitivanje okolnog tla za procenu efektivnosti prodiranja sredstva, a laboratorijska ispitivanja za procenu poboljšanja osobina. Mogući neželjeni efekti su visok sadržaj vode, visok pritisak koji slabi tlo, kao i zagađenje vode krečom.

Opiti na železnici pokazuju da ovo poboljšanje traje relativno kratko pošto se pod opterećenjem od voza usitnjavaju glineno-krečne grudve [5].

5.1.3 Delovanje strujom

Efektivan način poboljšanja mekanog glinovitog tla jeste smanjenje sadržaja vode. Kako takvo tlo nije moguće slobodno odvodnjavati, mora biti izazvan tok vode ka drenaži. Prilikom izgradnje novih pruga, moguća je konsolidacija dugovremenskim opterećivanjem. Kod postojećih pruga, alternativa – iako skupa – jeste putem elektroosmoze. Električna struja prolazi kroz tlo između elektroda, pri čemu molekuli vode migriraju sa anode u okoline drenaže (katode), odakle se odvoде. Ova metoda je ekonomična za zasićena i normalno konsolidovana blata i gline s niskom koncentracijom

5.1 Altering formation properties in place

5.1.1 Grouting

By grouting a material is injecting into the soil to strengthen it, change it or to decrease its permeability.

Penetration grouting strengthens the soil by bonding the particles or decreases the permeability by sealing voids, or both. For the successful grouting the soil or rock must be relatively permeable. For reducing the sands and gravel permeability in track formation the injection with cement mortar, clay-water slurry, sand and fly ash can be used. The particles of these materials are too large to penetrate voids in silts and clays, or in sands and gravels with silt and clay components of more than 10%. So, penetration grouting is unsuitable for use with fine silts and clays. Chemical grouts (commonly silicates) can penetrate into coarse silts and medium to fine sands. In situ and laboratory permeability tests, as well as a grain size analysis, will judge the ability of grout to penetrate into soil. It is suggested [9] that D_{15} of the soil should be at least 25 times the D_{85} of the grout particles. Strength tests are needed to estimate the formation improvement.

Compaction grouting compacts and/or displaces surrounding soil by the pressure of grout material bulb. Compaction grout is a very stiff mixture of cement, sand, fly ash, clay and water, which is pumped by means of pipe to the desired depth at pressure of 700-4000 kPa. This treatment is not suitable for strengthening saturated cohesive soils which are incompressible, because the soil can be displaced by the grout pressure in shallow depths.

5.1.2 Lime slurry pressure injection

The lime slurry is pumped into the soil through pushed in pipes at pressure of 340 - 1700 kPa and penetrates through fissures, cracks or permeable seams. Disadvantages are little control over the lime distribution and danger of soil fracture and forming the new cracks. Therefore the surrounding soil investigation is needed to assess the effectiveness of slurry distribution and laboratory tests to evaluate the soil improvement. Possible adverse effects are high water content, high pressure which weakens the soil and water contamination by the lime.

Railway tests have shown that this improvement lasts for relatively short time as the clay-lime crumbs were crushed under the train loads [5].

5.1.3 Electrical treatment

An effective way to improve soft clayey soils is to reduce the water content. As such soils are not free draining, the flow into the drains must be inducted. For new track construction the soil strengthening by long term loading is possible. For existing track an alternative, although expensive, is through electro-osmosis. A direct electric current is passed through the soil between electrodes and the water molecules migrate from the anode into the drain surrounding (cathode), from where they are removed. This method is economical for saturated and normally consolidated silts and clays and

porne vode kao elektrolita.

Tipičan sistem elektrohemijske stabilizacije sastoji se od izbušenih gvozdениh ili aluminijskih cevi kao anoda ugrađenih na 1 do 5m od katoda. Kroz njih se u tlo ubacuje rastvor kalcijum-hlorida, natrijum-hlorida, magnezijum-hlorida ili aluminijum-hlorida, koji se kreće ka katodama, gde se voda skuplja i uklanja.

Ispitivanja na terenu su poželjna za proveru efektivnosti metode. Izbor tipa anode i elektrolitskog rastvora zahteva hemijsku analizu minerala gline. To je vrlo skupa metoda i koristi se tamo gde druge nisu izvodljive. Glavna prednost, kao i kada je u pitanju elektroosmoza, jeste to što se elektrode ugrađuju sa suprotnih strana koloseka i što se ne prekida saobraćaj prugom.

5.2 Rekonstrukcija i zamena

5.2.1 Zbijanje

Zbijanje je proces zgušnjavanja tla mehaničkim presovanjem, na račun smanjenja zapremine šupljina ispunjenih vazduhom, pri čemu vlažnost ostaje nepromenjena. Sto posto zasićena tla se ne mogu zbijati, već konsolidovati, što se postiže postepenim potiskivanjem vode iz pora. Cilj zbijanja je poboljšanje svojstava planuma: povećanje čvrstoće i krutosti, a smanjenje stišljivosti, plastične deformacije pod učestalim opterećenjem, propustljivosti, bubrenja i skupljanja. Međutim, povećanje gustine je parametar koji se najčešće koristi za specifikaciju željene veličine zbijanja i određivanje stanja zbijenosti i podrazumeva poboljšanje ostalih pobrojanih parametara.

Data energija zbijanja ne proizvodi istu veličinu zbijanja i krutosti za svako tlo, što je na slici 2 pokazano za tri vrste tla. Za istu energiju, procenat zbijanja povećava

clays with low pore-water electrolyte concentration.

Typical electrochemical stabilization system consists of perforated iron or aluminium pipes as anodes installed about 1-5m away from the cathodes. A solution as calcium, potassium, magnesium or aluminium chloride is fed into the anodes entering the soil, and moves toward the cathodes, where water collects and removed.

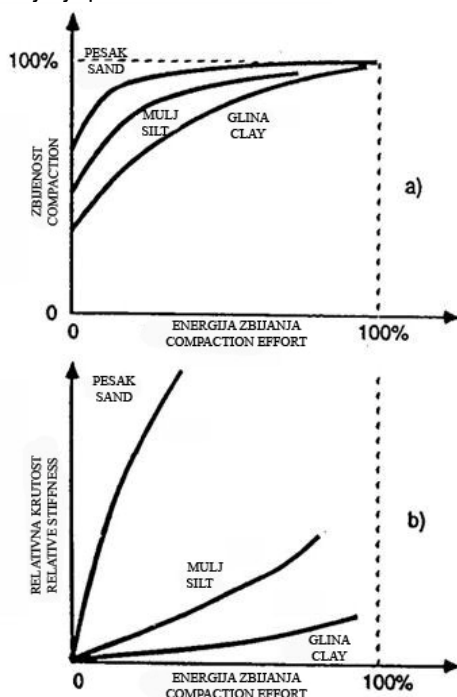
In situ tests are desired to evaluate the effectiveness of the method. Selection of the anode type and electrolyte solution requires chemical analyses of the clay minerals. The method is very expensive and is to be used only where other are not feasible. The main advantage, as for electro-osmosis, is that the work can be done without disrupting the train operation, because the pairs of electrodes would be installed on opposite sides of the track.

5.2 Reconstruction and replacement

5.2.1 Compaction

Compaction is the process of soil densification by mechanical pressing and in that way reduction in volume of air voids, while the moisture content remains unchanged. The aim of compaction is to improve soil properties, such as: increasing strength and stiffness; decreasing compressibility, plastic strain under repeated load, permeability, and reducing swelling and shrinking. However, density is the most commonly used parameter for specifying the desired amount of compaction and for determining the state of compaction and implies an improvement in the other parameters.

A given compaction effort does not produce the same strength and stiffness for all soils, that is shown for the three soil types in Figure 2. For the same effort the



Slika 2. Uticaj vrste tla na promenu zbijanja i krutosti sa energijom zbijanja
Figure 2. Effect of soil type on variation of compaction and stiffness with compaction effort

se kako tlo postaje krupnije – slika 2a [9]. Za isti procenat zbijenosti, rezultujuća krutost se povećava, od gline, preko prašine, do peska – slika 2b [9]. Razlike su još veće za konstantnu energiju zbijanja. Ovo je važno uzeti u obzir prilikom određivanja potrebne energije zbijanja na terenu.

Zbijanje se najčešće radi pločama i valjcima (statični i vibracioni). Zbog njihove ograničene efektivne dubine zbijanja, neophodno je zbijanje u slojevima od 15 do 30 cm. Postoje i tehnike dubinskog zbijanja udarnim zbijanjem ili vibracionim zbijanjem vodenim mlazom.

5.2.2 Zamena

Ako se zasićena ili skoro zasićena tla dovoljno isuše, mogu se ukloniti i zameniti zbijanjem u slojevima. Ovo je izgleda izvodljivije za grubo granulirana ili prašinasta tla, nego za glinu koju je teško osušiti. Međutim, granulirana ili prašinasta tla neće biti zasićena ako nisu ispod nivoa podzemne vode, pa je potrebno odvodnjavanje terena za vreme njihovog uklanjanja i zamene. Ako zbijanje nije izvodljivo, zasićena tla, posebno meke gline, potrebno je ukloniti i zameniti tlom koje ima vlažnost pogodnu za zbijanje.

Organska tla neprihvatljiva su za planum, te se moraju ukloniti i zameniti pogodnim tlom.

5.2.3 Stabilizacija dodacima

Kao dodatak iskopavanju i zameni sa zbijanjem tla, ili površinskom zbijanju, osobine tla se mogu poboljšati mešanjem s materijalima kao što su cement, kreč, bitumen i leteći pepeo.

Mešanje se najbolje izvodi specijalnom opremom za mešanje i usitnjavanje. Često se koristi konvencionalna oprema – drljače, buldožeri, grejleri, skreperi. Specijalne mašine iskopavaju sloj tla, prevoze ga u mešalice i rasprostiru promenjeno tlo sa zadnje strane bubnja mešalice u neprekidnom procesu. Mogući su zahtevi za povećanje ili smanjenje postojećeg sadržaja vode pre dodavanja aditiva, kako bi se postigli prihvatljivi rezultati.

Cement se može upotrebiti za stabilizaciju skoro svih vrsta tla, izuzev organskih, slanih ili sulfatnih materijala. Krupnozrni šljunak zahtevao bi više cementa, a teške gline otežavaju mešanje. Najpogodniji je široko graduiran pesak i šljunak. Uopšte, ova stabilizacija treba da se ograniči na tla s manje od 35% čestica koje prolaze kroz sito (0,075 mm) i imaju indeks plastičnosti manji od 30% [9].

Cementnom stabilizacijom postižu se sledeća poboljšanja osobina planuma:

- povećana čvrstoća, uključujući i zateznu;
- povećana krutost;
- povećana otpornost na uslove vlaženje–sušenje i zamrzavanje–otapanje;
- smanjenje propustljivosti, osim kod glina;
- smanjenje bubrenja u plastičnim glinama.

Količina potrebnog cementa menja se s tipom tla i zahtevanim osobinama, ali je obično između 5 i 15% od težine suvog tla.

percent compaction increases as the soil becomes more coarse-grained – Figure 2a). For the same percent compaction the resulting soil stiffness increases from clay to silt and sand - Figure 2 b). The contrast is greater for constant compaction effort. These are important considerations in determining the required compaction effort for a given application.

Compaction is most commonly done using surface rollers, static and vibratory. As the roller have the limited effective depth of compaction, it works in layers of 15-30cm. Deep compaction techniques, by dropping heavy weight or by inserting of vibration accompanied with water jets, are available.

5.2.2 Replacement

If saturated or nearly saturated soils can be dried sufficiently, they can be removed and replaced by compaction in layers. This would more likely be feasible for coarse-grained or silty soils than for clayey soils, which are much difficult to dry. However, coarse-grained or silty soils would probably not be saturated unless they were below the ground water table and dewatering of the site would be required during the soil excavation and replacement. If consolidation is unfeasible, the saturated soils, especially soft clays, would need to be removed and replaced with soil which has moisture suitable for compaction.

Organic soils are unacceptable as a track formation and must be replaced by an acceptable soil.

5.2.3 Admixture stabilization

As a supplement to excavation and replacement with compaction, or to surface compaction, soil properties can be improved by mixing in materials such as cement, lime, bitumen and fly ash.

Mixing is best performing by special mixing/pulverizing equipment. Conventional equipment is frequently used, like harrows, bulldozers, graders, scrapers. Some special machine excavates a soil layer, transports it to mixing drum and deposits the modified soil out the drum rear end in continuous process. Increasing or decreasing the existing moisture content may be required prior to adding the stabilizing material in order to achieve acceptable results.

Cement may be used to stabilize almost all soil except organic, salt or sulphate materials. Coarse gravel requires high cement content and heavy clays show mixing difficulties. Broadly-graded sands and gravels are best suited. Generally, this stabilization should be limited to soils with less than 35% passing the 0,075 mm sieve and a plasticity index of less than 30% [9].

Cement stabilization achieves the following formation performance improvements:

- Increases strength including tensile;
- Increases stiffness;
- Increases resistance to wet-dry and freeze-thaw condition;
- Lowers permeability, except for clay;
- Decreases swelling of plastic clays.

The amount of required cement will vary with the soil type and required properties, but falls within the range of 5-15% of dry weight of soil.

Cementom stabilizovana tla, postavljena preko tla s manjom krutošću zbog pojave horizontalnog napona zatezanja, mogu pući i izgubiti neke konstruktivne uloge.

Kreč se može upotrebiti za poboljšanje većine tla u planumu, koja sadrže neke frakcije minerala gline (min 7% od težine) i indeks plastičnosti veći od 10%. Dobro je poznato da glinovito tlo, pomešano s krečom, formira grudvastu strukturu, smanjujući bubrenje s vodom i povećavajući nosivost. Uobičajena je količina između 3 i 7% kreča od težine tretiranog tla.

Glavna prednost upotrebe kreča jeste to što daje trenutno i drastično poboljšanje obradljivosti glinovitog tla, tako da često obezbeđuje jedini način rada s mekim vlažnim glinovitim tlom, pre nego metoda iskopavanja i zamene takvog tla. Takođe, krečom tretirano tlo nije podložno pucanju kao cementirano. Međutim, kreč nije pogodan ako se zahteva nagli porast čvrstoće.

Kreč se ponekad upotrebljava u kombinaciji s drugim dodacima: sa cementom ili bitumenom da bi se poboljšala obradljivost tla i unapredilo mešanje i zbijanje, s letećim pepelom radi obezbeđenja komponenti minerala gline potrebnih za reaktivnost u čisto granularnom tlu.

Kreč se mešao u planume pruga s dugim šinskim tracima, posebno na krajevima mostova (prelazne zona), radi sprečavanja sleganja, ali na linijama s velikom gustinom saobraćaja nije pokazao dugotrajni efekat i postupak je ponavljan više puta [5].

Bitumen se koristi za vezivanje tla koje je uglavnom zrnasto sa ograničenim česticama (<0,075 mm), gde se svrstavaju i čist šljunak i pesak. Nije pogodan za vlažna tla, pošto dodavanje tečnog bitumenskog stabilizatora pogoršava karakteristike takvog tla, koje su potrebne za zbijanje. Mešavine tlo-bitumen prave se s razređenim asfaltom, emulzijom ili penom, radi unapređivanja procesa mešanja. Bitumen povećava čvrstoću tla i smanjuje njegovu propustljivost. Ako se previše bitumena doda, smanjuje se čvrstoća. Da bi se postigla vodootpornost, bitumenska emulzija može da se prska po površini zbijenog planuma i utiskuje u njega, tako da tanki bitumenski film sprečava prodiranje vode. Ovaj proces može da bude efikasan za obradu planuma koji omekšavaju u prisustvu vode, pa nivo podzemne vode mora da bude dovoljno nizak. U tom slučaju, razmekšavanje tla ne izaziva voda zarobljena ispod bitumena.

5.3 Primena asfalt-betona

Asfalt-beton je mešavina bitumena i drobljene stene. Preporučena mešavina za planum pruge jeste široko graduiran lomljeni kamen (maksimalne veličine zrna od 25 do 37 mm) s nešto više bitumena i sitnog agregata nego za kolovoze, i sa 1-3% šupljina.

Dva načina primene asfalt-betona u planumu pruge jesu: po celoj dubini zastorne prizme ili samo u donjem delu zastorne prizme.

Učinci asfalt-betona mogu se proceniti iz uloga zastora i planuma pruge.

Za zastor:

- veća vertikalna nosivost, ali manja podužna i bočna otpornost;
- elastičnost oslanjanja koloseka je smanjena, pošto asfalt-beton ima viši modul od zastora, ali

Cement stabilized soils over soils with a lower stiffness will develop horizontal incremental stress can crack under the train load and lose some of its structural benefits.

Lime may be used to treat most soils that have at least some clay fraction (min 7% by weight) and plasticity index which exceeds 10%. It is well-known that a clayey soil mixed with lime develops a crumbled structure that reduces the plasticity, reduces the swelling with water and increases strength. The required quantity of lime is directly related to clay content. A range of 3-7% by weight of lime will treat most soils.

The main advantage of using lime is that it produces immediate and dramatic improvements in the workability of clayey soil, often proving the only way to work with soft wet clayey soil other than excavating and replacing it. Also, lime-treated soils are not as susceptible to cracking as cement-treated. However, lime is unsuitable if the rapid increase in strength is required.

Lime is sometimes used in combination with other additives: with cement or bitumen to improve soil workability and promote mixing and compaction, with fly ash to provide the clay mineral component required for reactivity in clean granular soils.

Lime was mixed into CWR track formations, particularly at the ends of bridges (transition zones), to prevent the recurring settlement, but in heavy traffic lines show short-term effect and was repeated several times [5].

Bitumen is used to stabilize the soils that are mostly granular with limited plastic fines (less than 0.075mm), in which belong clear sands and gravels. It is unsuitable for the wet soils, because adding the liquid bitumen worsens its characteristics needed for compaction. Soil-bitumen mixtures are made with asphalt cutback, emulsion or foam to promote mixing with soil. Bitumen increases soil strength and decreases its permeability. If too much bitumen is added, strength will decrease. To achieve waterproofing, bitumen emulsion can be sprayed on the surface of the compacted formation and penetrate downward, so the thin bitumen film prevents water infiltration. This process may be effective for the railway formations that soften in the presence of water, so the groundwater level must be low enough. In that case the softening is unlikely due to water trapped beneath the bitumen.

5.3 Asphalt-concrete application

Asphalt-concrete is a mixture of bitumen and crushed stone. The recommended mixture for track formation use is broadly-graded crushed stone (maximum grain size of 25-37mm) with slightly more bitumen and aggregate fines than in highway, and with 1-3% air voids.

Two ways of using asphalt-concrete in the track substructure are: either in full-depth ballast bed or in ballast bottom. In both cases the crib and shoulder of the ballast remain.

The effectiveness of the asphalt-concrete design can be evaluated from the ballast and formation functions.

For the ballast:

- Increased vertical bearing, but decreased lateral and longitudinal resistance;

elastičnost pruža donji stroj;

- efikasno odvodi atmosfersku vodu;
- podbijanje nije moguće u primeni asfalt-betona celom dubinom, pa je podešavanje vertikalne geometrije otežano;
- za istu debljinu zastora, asfalt-beton smanjuje naprezanje donjih slojeva, sve dok ostaje neoštećen, što znači da pucanje mora biti sprečeno pravilnim projektovanjem;
- obezbeđena je izolacija za zaštitu od mraza;
- ne podstiče rast vegetacije;
- obezbeđeni su apsorpcija buke i smanjenje vibracija;
- rekonstrukcija koloseka je mnogo teža i skuplja.

Za planum:

- na smanjenje naprezanja može se uticati pravilnim projektovanjem;
- zaštita od mraza može da se smanji ako je debljina sloja asfalt-betona manja od debljine zastora, zbog boljeg rasprostiranja opterećenja;
- sprečeno je međusobno prodiranje čestica zastora i planuma;
- sprečeno je „pumpanje” finih čestica nagore iz drugih slojeva donjeg stroja;
- sprečeno je habanje planuma zastorom;
- obezbeđeno je odvođenje površinske vode.

Bolje je sloj asfalt-betona postaviti na zaštitni drenažni sloj, nego direktno na planum, jer on predstavlja dobru osnovu za razastiranje i zbijanje asfalt-betona .

Ukratko, da bi projekat sa asfalt-betonom u punoj visini zastora bio prihvatljiv, mora da ispuni dva uslova:

1. smanjenje elastičnosti oslanjanja koloseka i smanjenje poprečne i podužne stabilnosti mora biti u prihvatljivim granicama;

2. potreba za podešavanje geometrije i za rekonstrukciju mora se isključiti.

Zahtevana debljina asfalt-betona zavisi od osovinskog opterećenja, gustine saobraćaja i krutosti planuma. Tipični projekti u SAD koriste od 10 do 20 cm debeo sloj asfalt-betona samo u donjem delu zastorne prizme sa 12,5 do 25 cm tucanika do osnove praga. Primena asfalt-betona u SAD, u najviše slučajeva, jeste prilikom rehabilitacije kratkih deonica koloseka kao što su ukrštaji, skretnice, prilazi mostu, tunelske podloge i ukrštaji s putevima u nivou i ta mesta su često problematična za održavanje [9].

5.4 Stabilizacija klizišta

Stabilizacija deonica koloseka s potencijalnim klizištem je bitna jer klizišta narušavaju planum pruge. Poremećaji mogu biti grupisani na sledećim mestima: kosine useka; kosine nasipa; podloga nasipa; planum pruge.

Poremećaj ili kretanje *kosina useka*, formiranih za vreme izgradnje pruge, mogu prouzrokovati pomeranje i u planumu pruge i prekid saobraćaja, nanosima zemlje i stena na prugu. Problem stabilnosti obično nastaje od vode unutar njih, delovanjem pritiska i smanjenjem otpornosti na smicanje. Rešenja uključuju jednu mogućnost ili više sledećih mogućnosti: skrenuti vodu koja dolazi odozgo, što je moguće više; postaviti

– Track resiliency is reduced because asphalt-concrete has a higher modulus than ballast, but most of the resiliency gives the formation;

- Effectively shed water coming onto the track;
- Tamping is not possible with asphalt-concrete in full-depth ballast and track vertical geometry will be difficult;
- For a given ballast thickness, asphalt-concrete will reduce stress on bottom layers as long as it remains undamaged that means the cracking must be prevented by proper design;
- Frost protection will be provided;
- Vegetation growth will not be promoted;
- Noise absorption and vibration attenuation will be affected;
- Track renewal will be much more difficult and expensive.

For the formation:

- On the stress reduction can be influenced by proper design;
- Frost protection could be less with the asphalt-concrete if the layer depth is less than the ballast depth, because of the better load spreading;
- Interpenetration of ballast and formation grains will be eliminated;
- "Pumping up" of fines from the other substructure layers will be prevented;
- Formation attrition by ballast is eliminated;
- Water shedding is provided.

A granular drainage layer beneath the asphalt-concrete, rather than directly on the formation, might be desirable, because it also provides a good bed for placing and compacting the asphalt.

In summary, two conditions must be met for the asphalt-concrete in full-depth ballast design to be viable:

- Track resiliency reduction and the lateral and longitudinal stability reduction must be within acceptable limits;
- The need for geometry adjustment and renewal must be eliminated.

The required thickness of the asphalt-concrete layer depends on the axle loads, the traffic amount and the formation stiffness. Typical designs in USA have used thickness of 10-20cm in ballast bottom with 12.5-25cm of ballast to the sleeper bottom. The majority of asphalt-concrete application at USA railway lines have been for rehabilitation short track sections such as turnouts, crossings, bridge approaches, tunnel floors and level crossings, because these are maintenance problematic areas [9].

5.4 Slip stabilization

The stabilization of track sections with potential slip failures is essential, because they will affect track formation. The failure location may be grouped as: cut slopes, embankment slopes, embankment foundation and track formation.

Failure or movement of *cut slopes*, formed by track building, can cause movement of the track formation and interrupt traffic by depositing earth and rock on the track. The stability problem usually arises from water within the slope exerting pressure and decreasing the shearing resistance. The solutions include one or more of the

drenaže unutar kosine; ublažiti kosinu; dodati ankere ili potporne konstrukcije. Useci u ekspanzivnim glinama mogu izazvati poteškoće zbog rasterećenja pri uklanjanju zemlje, u kombinaciji sa izlaganjem ciklusima vlaženja i sušenja. Tada je potrebna zaštita od promene vlažnosti ili ublaženje kosina.

Poremećaj unutar postojećeg *nasipa* obično je rezultat prodiranja vode usled jakih padavina i poplava, koje smanjuju nosivost tla na smicanje i povećavaju težinu. Zaštita od velikih padavina je odvodnjavanje nasipa. Tamo gde se očekuje poplava, kosine mogu biti ublažene ili se prave berme da obezbede odgovarajući faktor sigurnosti od poremećaja. Alternativno, može biti potrebno ojačanje dodavanjem potpornih zaštitnih konstrukcija. Erozija postojećih kosina nasipa takođe smanjuje njihovu sigurnost, pa je poželjna preventivna zaštita.

Poremećaj podloge nasipa češći je kod novih pruga, jer konsolidacija tla s vremenom pod težinom nasipa povećava njegovu otpornost. Međutim, povećane padavine i poplave mogu oslabiti osnovu nasipa i kasnije, pa će ublaženje kosina i ugradnja bermi takođe smanjiti ove potencijalne poremećajne sile.

Najkritičnija moguća situacija postoji kada je nasip na padini. Pomeranje nasipa može da se desi klizanjem nizbrdo po površinama kroz nasip ili kroz tlo unutar padine, s pretpostavkom da su stepenasti zaseci bili korišćeni da zadrže nasip na padini. To pomeranje može nekada početi odmah nakon izgradnje pruge, a verovatnije kao rezultat promena u uslovima površinskog ili podzemnog odvodnjavanja. Ovaj problem mora da se reši pre nego što se poremećaj desi – obezbeđenjem pravilnog odvodnjavanja.

5.5 Ugradnja zaštitnog sloja

Ako planum ne ispunjava postavljene zahteve, potreban je zaštitni sloj odgovarajuće debljine od šljunkovito-peskovitog materijala određene granulacije. U suprotnom, takvo stanje planuma vodilo bi većim troškovima održavanja geometrije koloseka, smanjenju veka trajanja cele pruge, smanjenju brzina vozova i tako dalje.

Zaštitni sloj ugrađuje se sa sledećim zadacima:

- nosivi sloj (raspodelom opterećenja na veću površinu, štiti donji stroj od prevelikog naprezanja);
- zaštitni sloj od smrzavanja (efektom toplotne izolacije, štiti tlo ispod planuma, osetljivo na mraz);
- filtrirajući i razdvajajući sloj (sprečavanjem mešanja zastora s donjim strojem, kao i sprečavanjem migracije finih čestica u zastor);
- izravnavajući sloj (ako je kolosek oslonjen neujednačeno i neogovarajućeg bočnog nagiba);
- pokrivajući sloj (sa smanjenom vodopropustljivošću štiti tlo osetljivo na vodu od površinskih voda);
- sloj za sprečavanje habanja planuma od strane zastora;
- sloj za ublažavanje vibracija od vozila, koloseka i zemljanog trupa.

Zaštitni sloj treba da ima sledeće karakteristike:

- uglavnom vodonepropustan ili vodopropustan u određenim granicama, tako da najveći deo vode oteče po planumu;

following possibilities: divert water coming from above to the extent possible, install drains within the slope, flatten the slope, add anchors or retaining structures. Cuts in expansive clays can give difficulties, because of unloading from soil removal combined with exposure to wetting and drying cycles. Protection from moisture change or slope flattening may be required.

Failure within existing *embankments* usually results from water infiltration by heavy rainfall or flooding, which reduces the soil shear strength and increases its weight. Drainage of the embankment protects from the heavy rainfall. In areas where flooding is expected, the slopes have to be flattened or have berms to provide an adequate safety factor against failure. Alternatively, strengthening through the additional of retaining structures may be necessary. Erosion of existing embankment slopes will also decrease their safety factor and slope preventive protection must be provided.

Failure of the embankment foundation is more usually with new track construction, since consolidation of the soil under the embankment weight will increase the foundation strength over time. However, increasing rainfall or flooding could weaken the foundation strength at a later time, so the flattened slopes and berms will reduce this potential force of failure as well.

The most critical situation exists when the embankment is on the side of a hill. Embankment movement could occur downhill along embankment surfaces or through the soil within hill, assuming that benches are used to key the embankment into the hill. This movement may begin after track construction, but probably as a result of changes in surface or subsurface drainage conditions. This problem must be corrected before failure occurs by providing proper drainage.

5.5 Insertion of protective layer

If the track formation does not satisfy the stated requirements, the protective layer of appropriate thickness made of gravel-sand material definite grading is needed. Otherwise, such formation state would lead to high costs of track geometry maintenance, decrease of track life cycle, reduction the train speeds and so on.

The formation protective layer is inserted to fulfil the following functions:

- Supporting layer (by load distribution effect protects the subsoil from too high stress);
- Frost protective layer (by its thermal insulating effect protects frost sensitive soils bellow the formation);
- Filtering and separating layer (by preventing the ballast from mixing in with substructure and fines from rising into the ballast);
- Equalizing layer (if track is supported unevenly and with unsuitable cross fall);
- Covering layer (with low water permeability protects soils sensitive to water from surface water);
- Attrition prevention layer (against ballast attrition);
- Vibration attenuation layer (from vehicle, track and subsoil).

Protective layer would have the following characteristics:

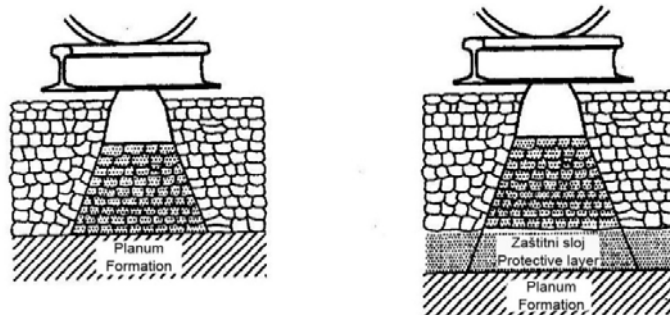
- Mostly impermeable to water or permeable to such extent that the majority of the water runs off the formation;

- filterski stabilan prema donjem stroju ili tlu, inače mu se poveća debljina za 10cm ili se doda geotekstil;
- elastičnost (modul elastičnosti), što ujednačenje od zastora ka donjem stroju;
- pri debljini preko 30cm, ugrađuje se i zbija u dva sloja;
- trajan na abraziju i drobljenje.

Geometrijski zahtevi za zaštitni sloj, odnosno planum:

- minimalne debljine 20 cm;
- bočni nagib najmanje 1:25–1:20 ili 4–5% s tolerancijom od 0,5%;
- ne sme da odstupa više od ± 2 cm od projektovanog položaja;
- mora biti ravan u podužnom pravcu (≤ 2 cm na osnovici dužine 4 m), ne sme da ima ulegnuća i kolotrage, odnosno debljina zastora treba da je konstantna;
- na nasipima se izvodi do ivice kosine, a u usecima do sistema za podužno odvodnjavanje.

Slika 3 [10] poredi raspodelu naprezanja na planum kod koloseka sa zaštitnim slojem i bez njega.



Slika 3. Raspodela naprezanja na planum sa zaštitnim slojem i bez njega
Figure 3. Pressure distribution on formation with and without protective layer

Slika pokazuje da je pritisak na planum bez zaštitnog sloja mnogo veći i postavljaju se visoki zahtevi za nosivost tla. Čestice tla se penju i prljaju zastor, ugao rasprostiranja pritiska se smanjuje i pritisak na donji stroj se povećava. Usled zaprljanosti zastora, opada trajnost efekta podbijanja, pa ono mora češće da se sprovodi. U slučaju sa zaštitnim slojem, voda će putem njega biti odvođena i neće kvasiti donji stroj. Povećana debljina sprečava štete od zamrzavanja. Zaštitni sloj kao filter sprečava penjanje finih čestica tla. Trajnost podbijanja je velika, zastor se ređe čisti..

5.5.1 Dimenzionisanje zaštitnog sloja kao nosećeg

Da bi zaštitni sloj služio kao konstruktivni materijal, mora da ima dovoljno veliki modul elastičnosti i stabilnu akumulaciju plastičnih deformacija pod ponavljanim opterećenjem točkova. Debljina zaštitnog sloja mora se birati tako da postigne zahtevanu nosivost planuma. Kod tla osetljivog na mraz, treba ugraditi sloj za zaštitu od mraza.

Tabela 3 daje pregled zahteva za zaštitni sloj planuma i pokazuje kako ih odrediti [5].

- Filter stable against substructure or subsoil, otherwise should be thicker by 10cm or a geotextile should be inserted;

- Elasticity (modulus of elasticity) as uniform as possible from the ballast to the subsoil;
- Thicker than 30cm, have to be laid and compacted in two layers;
- Durable against attrition and crumble.

The following geometrical requirements have to be met by the protective layer, i.e. formation:

- Minimum thickness to be inserted is 20cm;
- Cross inclination of at least 1:25 – 1:20 or 4-5% with a tolerance of 0.5%;
- Must not deviate by more than ± 2 cm from the design position;
- Must be plane in longitudinal direction (≤ 2 cm on the basis of 4m), without any troughs or traffic traces, in other words must be of uniform thickness;
- On embankments must be up to edge of the slope and in cuts up to longitudinal drainage system.

Figure 3 [10] compares the pressure distribution on formation by the track with and without protective layer.

The figure shows that the pressure on the formation without protective layer is much higher and this makes high demands on the bearing capacity of the soil. Soil fines coming up contaminate the ballast, the pressure propagation angle is reduced and the pressure on the subsoil increases. As the ballast is contaminated, the durability of tamping decreases and the cleaning has to be performed more frequently. In the case with protective layer the water is led away through it and cannot soak into the subsoil. The increased thickness prevents frost damage. The protective layer as a filter prevents soil fines from rising. The tamping durability is high, ballast cleaning becomes less frequently.

5.5.1 Protective layer dimensioning as the bearing layer

To serve like constructive material, the formation protective layer have to be of high enough modulus of elasticity and the stable plastic deformation accumulation under the repeated wheels load. The thickness is chosen in such way as to achieve the required bearing capacity of the formation. By the soil sensitive to frost, a frost protective layer has to be inserted.

Table 3 gives a summary of the requirements for the formation protective layer and shows how to prove its suitability [5].

Tabela 3. Zahtevi za zaštitni sloj planuma
Table 3. Track formation requirements

osobine properties	zahtevi requirements	ispitivanje test / assessment
nosivost bearing capacity	zbijenost/density nosivost/bearing capacity elastičnost/elasticity	Proktorov opit/Proctor test opit pritiska pločom/plate load test opit sa padanjem tereta/ light hammer elastična deformacija/ elastic deformation
sleganje settlement	zbijenost/density minimizirana veličina šupljina/ minimized pore space bez habanja/no wear	Proktorov opit/Proctor test $n_a < 15\%$ dupli Proktorov opit/ double Proctor test
otpornost na mraz resistance to frost	mali udeo zrna/small portion of grains $d < 0,063\text{mm}$ (<5%) dobro odvodnjavanje/good drainage prekid kapilarnog penjanja/ capillary breaking	kriva granulometrijskog sastava/ grading curve
filtersko dejstvo filtering effect	filterska pravila/filter rules bez prenosa finih čestica/ no fines transportation	granulometrijski sastav/ grain distribution filterska pravila/filter rules
elastičnost elasticity	što veći procenat zrna kvarcnog peska/ highest possible portion of quartz sand	merenje ugiba praga/ measurement of the sleeper settlement

Prema [5] preporučuje se sledeći kriterijum za modul deformacije i zbijenost zaštitnog sloja po Proktoru:

- za nove pruge: $E_{v2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$ $D_{Pr} \geq 1.03$
- za postojeće pruge: $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ $D_{Pr} \geq 0.97$

Dozvoljeno naprezanje na zaštitni sloj, odnosno donji stroj, σ_{dozv} može se izraziti empirijskom formulom prema Klompu [5]:

$$\sigma_{dozv} = 0,006 E_{din} / (1 + 0,7 \log N) \quad [\text{MN/m}^2]$$

gde je:

E_{din} [MN/m^2] – dinamički modul elastičnosti zaštitnog sloja odnosno donjeg stroja,

N – broj prelazaka opterećenja za vreme kritičnog perioda (kod tla osetljivog na vodu i mraz to su periodi kiša i otapanja).

Kod poznatog modula deformacije E_{v2} , dinamički modul deformacije nevezanog tla može se uzeti kao: $E_{din} = 1,2 - 2,5 E_{v2}$.

Tabela 4 [5] pokazuje orijentacione koeficijente posteljice, dinamički modul elastičnosti i dozvoljena naprezanja na pritisak zaštitnog sloja za različita tla, zavisno od broja ponavljanja opterećenja, kada je zastor debljine 30cm i modula deformacije 150 MN/m^2 .

Nosivost se ocenjuje statičkim modulom deformacije E_{v2} , koji se određuje opitom pločom i dinamičkim modulom deformacije E_{din} , koji se određuje opitom s padajućim teretom. Otuda, da bi se debljina zaštitnog sloja odredila, moraju biti poznati sledeći moduli deformacije: modul deformacije planuma tla E_{v1} , sopstveni modul deformacije zaštitnog sloja E_{v2} , te modul deformacije planuma pruge E_{pl} . Sopstveni modul deformacije zaštitnog sloja kod adekvatne raspodele zrna i zbijenosti zaštitnog sloja može da se usvoji od 150

According to [5] the following criterion for modulus of deformation and Proctor's density is recommended:

- For the new tracks: $E_{v2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$ $D_{Pr} \geq 1.03$
- For the existing tracks: $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ $D_{Pr} \geq 0.97$

The admissible pressure σ_{adm} on formation protective layer, i. e. subsoil can be empirically determined according Klompp's formula [5]:

where are:

E_{din} [MN/m^2] – modulus of dynamic elasticity of formation protective layer, i. e. subsoil

N – number of load alternations during the critical period (rain and thaw periods for soils sensitive to water and frost)

When the modulus of deformation E_{v2} is known, the modulus of dynamic elasticity of incoherent soils may be assumed as: $E_{din} = 1,2 - 2,5 E_{v2}$.

Table 4 shows the approximate bed coefficient, modulus of dynamic elasticity and admissible compressive strain of different soils depending on the number of load repetitions for the ballast thickness of 30cm and the modulus of elasticity of 150 MN/m^2 .

The bearing capacity is assessed by modulus of static deformation E_{v2} which is determined in plate load test, and modulus of dynamic deformation E_{vd} which determined in drop hammer test. From there, to determine the thickness of the formation protective layer, the following modules of deformation should be known: the modulus of deformation of the earth formation E_{v1} , the modulus of natural deformation of the protective layer E_{v2} , and the modulus of deformation of the formation E_f . The modulus of natural deformation of the protective

do 200 MN/m². Modul deformacije planuma tla zavisi od sadržaja vode tla. Nosivost planuma tla je za vreme otapanja u proleće najmanja i tada veliki značaj ima ugrađeni sistem odvodnjavanja. Minimalna vrednost modula deformacije planuma tla može vrlo teško merno da se odredi, te se radi s proračunskim vrednostima. U tabeli 5 date su orijentacione vrednosti zavisne od materijala tla i hidroloških uslova [5].

layer by proper grain distribution and density may be assumed as 150 - 200 MN/m². The modulus of deformation of the earth formation depends on the water content. The bearing capacity is lowest during the thaw in spring, and then the drainage system becomes enormously important. The minimum modulus of deformation of the earth formation is very hard to determine by measures and, therefore, calculated values are applied. In Table 5 the approximate values, depending on the type of soil and hydrological cases, are given [5].

Tabela 4. Koeficijenti posteljice, dinamički modul elastičnosti i dozvoljena naprezanja na pritisak zaštitnog sloja za različita tla, zavisno od broja ponavljanja opterećenja
Table 4. Bed coefficient, modulus of dynamic elasticity and admissible compressive strain of different soils depending on the number of load repetitions

Klasifikacija tla/ Soil classification	c [N/cm ²]	E _{din} = 1,2 - 2,5 E _{v2}	σ _{adm} [N/cm ²]	
			N=10 ⁶	N=10 ⁷
loše/bad	3	10	1,2	1
	4	20	2,4	2
srednje/medium	7	50	5,8	5,1
dobro/good	9	80	9,6	8,1
	11	100	10,2	10

Tabela 5. Orientacione vrednosti modula deformacije planuma tla zavisno od materijala tla i hidroloških uslova
Table 5. Approximate modulus of deformation of the earth formation depending on type of soil and hydrological cases

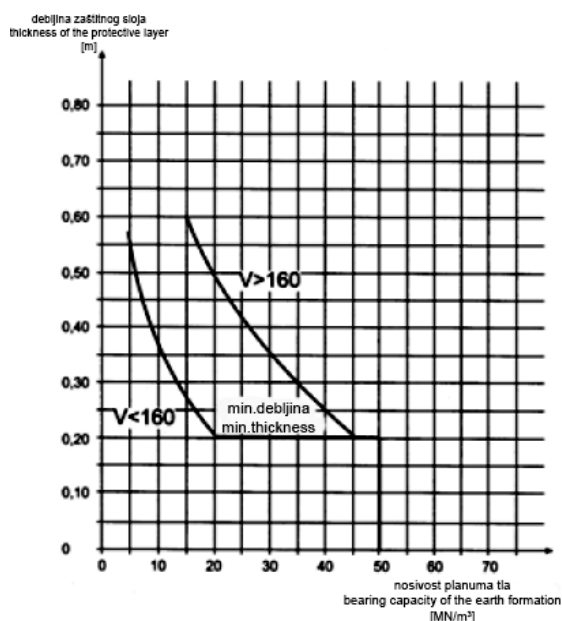
vrsta tla type of soil	dodatni zahtevi za udeo zrna/additional requirement grain share d < 0,1mm	moduli deformacije/ modulus of deformation E _{v1} [MN/m ²] Hidrološki slučajevi/hydrological cases		
		1	2	3
muljevit ili glinovit šljunak/ silty or clayey gravel	10-20%	60	30	20
muljevit ili glinovit pesak/ silty or clayey sand	10-20%	50	25	20
jako muljevit ili glinovit šljunak odn. pesak/ highly silty or clayey gravel e.i. sand	20-30%	40	20	15
	>30%	30	15	10
mulj ili glina/ silt or clay	lako plastični slightly plastic	25	15	10
	srednje plastični medium plastic	25	15	10
	jako plastični very plastic	20	15	10

Hidrološki slučajevi/Hydrological cases:

- 1 – nema dodatnog natapanja, nenačet planum / no additional soaking, integer formation
- 2 – povremeno natapanje, loše oticanje vode / occasional soaking, bad water drainage
- 3 – stalno natapanje, bez oticanja vode / permanent soaking, no water drainage

Pri izrazito maloj nosivosti planuma tla, kada je E_{v1} < 10 MN/m², najbolje je sprovesti zamenu tla. Debljina zaštitnog sloja planuma pruge može se dimenzionisati zavisno od predviđene brzine na pruži i nosivosti (modula deformacije) planuma tla, prema dijagramu na slici 4 [5].

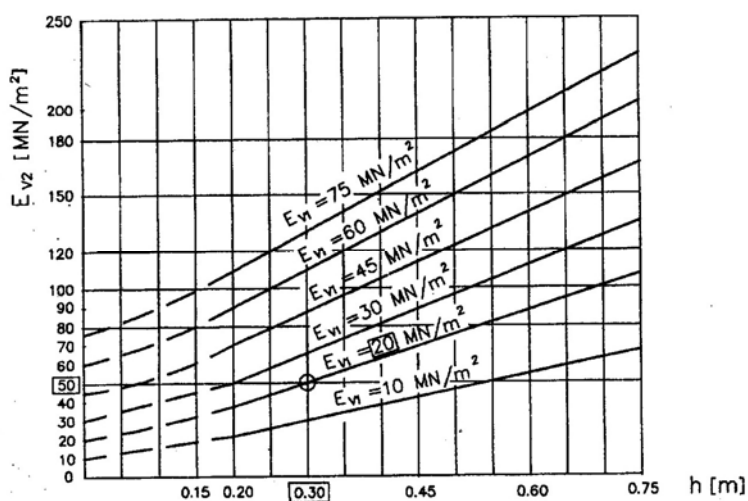
When the bearing capacity of the earth formation is very low, when it is E_{v1} < 10 MN/m², it is advisable to replace the soil. According to the Figure 4 [5], the thickness of the track formation protective layer can be dimensioned depending on target line speed and the bearing capacity (modulus of deformation) of the earth formation.



Slika 4. Dimenzionisanje debljine zaštitnog sloja planuma pruge
 Figure 4. Dimensioning the thickness of track formation protective layer

Prema standardima nemačkih železnica [6], s poznatom vrednošću modula deformacije planuma tla E_{v1} i zahtevanog modula deformacije zaštitnog sloja E_{v2} , putem dijagrama na slici 5, može se odrediti minimalna debljina zaštitnog sloja.

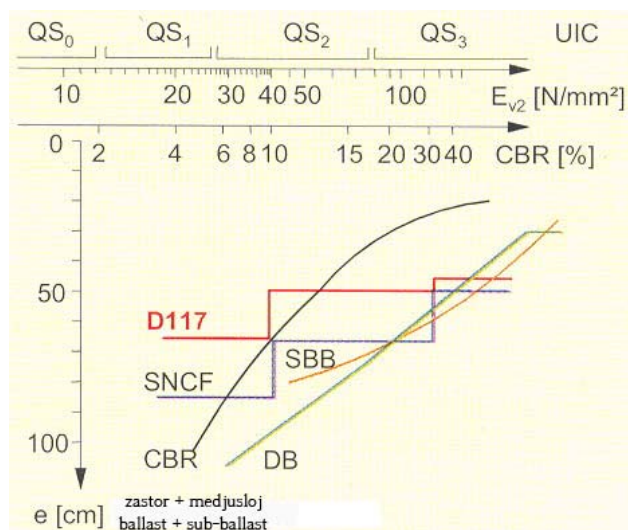
Furthermore, according to DB standards [6], with known value of the modulus of deformation of the earth formation E_{v1} and required value of modulus of deformation of the protective layer E_{v2} , with help of the diagrams in the Figure 5, the minimum protective layer thickness can be determined.



Slika 5. Određivanje minimalne debljine zaštitnog sloja iz poznatog E_{v1} i zahtevanog E_{v2}
 Figure 5. Determination the minimum protective layer thickness from known E_{v1} and required E_{v2}

ORE komitet D117 [1], na osnovu velikih serija merenja i proračuna, dao je traženu ukupnu debljinu, koja se sastoji od 25 cm zastora i jednog ili više međuslojeva ispod njega. Na slici 6 prikazane su krive koje se koriste na raznim železnicama (DB, SNCF, SBB), na osnovu CBR indeksa. Slika takođe ukazuje i na razne načine klasifikacije tla, kao što je putem CBR indeksa, modula elastičnosti i prema UIC preporuci 719R.

ORE Committee D117 [1], on the basis of the major series of measures and calculations, gives the desired total depth consisting of a 25cm ballast layer and one or more intermediate layers below it. In the Figure 6, the curves used by various railways (DB, SNCF, SBB) based on the CBR (California Bearing Ratio) index, are plotted. Figure 6 also indicates the various scales for classification of soils, such as CBR, modulus of deformation, and according to UIC leaflet 719R.



Slika 6. Podaci iz ORE D117
Figure 6. Data from ORE D117

Još jedan način određivanja preporučene debljine zaštitnog sloja zajedno sa zastorom, zavisno od koeficijenta posteljice zastora c i geometrije pragova, dat je u tabeli 6 [5].

One more way of determination the recommended thickness of the protective layer together with ballast bed related to the coefficient of ballast c and the sleeper geometry is given in the Table 6 [5].

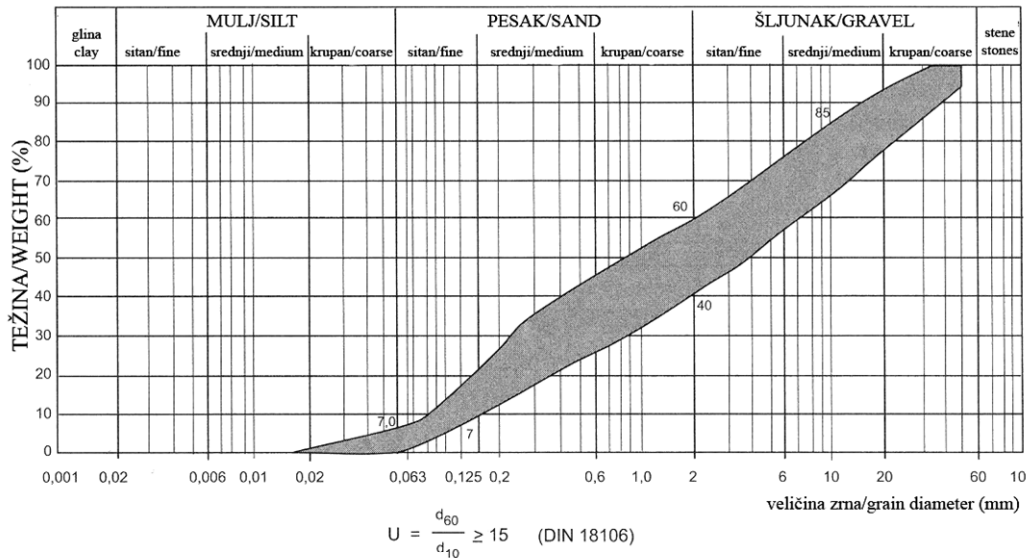
Tabela 6. Debljina zaštitnog sloja + zastor zavisno od koeficijenta posteljice zastora c i geometrije pragova
Table 6. Thickness of protective layer+ballast related to the coefficient of ballast c and the sleeper geometry

pragovi sleepers		osovinsko opterećenje axle load [kN]	200		250		300	
dužina length	razmak spacing	c [kN/cm ³]	50	100	50	100	50	100
240	55	debljina (zastor+zaštitni sloj) thickness (ballast+protective layer) [cm]	60	30	80	45	100	65
260	55	debljina (zastor+zaštitni sloj) thickness(ballast+protective layer) [cm]	45	30	65	35	80	50

Linija prosejavanja materijala zaštitnog sloja planuma pruge prikazana je na slici 7 [5]. Šrafirano područje je dozvoljeno područje prosejavanja prema DB propisima. Za izradu planuma u slučaju tla osetljivih na vodu, njegov zaštitni sloj treba da je od vodonepropusne mešavine zrna KG1, koja ima najveći modul deformacije od 250 MN/m².

The usual grain mixture applied for formation protective layer is represented in Figure 7 [5]. In the shaded surface have to be the scatter of admissible grading curves according to DB regulations. For the formation construction in the case of water sensitive soils, its protective layer would consist of the water impermeable grain mixture KG1, which has the highest modulus of deformation of 250 MN/m².

MEŠAVINA KG 1/GRAIN MIX KG 1
područje optimalne granulometrijske krive/optimum grain size range



Slika 7. Mešavina za zaštitni sloj planuma pruge
Figure 7. Grain mixture for formation protective layer

5.5.2 Uloga odvodnjavanja i filterska stabilnost zaštitnog sloja

Materijal zaštitnog sloja treba da bude takvog sastava zrna i zbijenosti da spreči migracije i prodiranje čestica tla u zastor, dok voda može da prolazi (razdvajajuća uloga zaštitnog sloja). To će se ostvariti kada stepen neujednačenosti zrna zaštitnog sloja bude preko 15 i kad filtersko pravilo po Tercagiju (slika 8 [5]) bude ispunjeno poznatim odnosom:

$$D_{15} \leq 4 \times d_{85}$$

Time je krupnoća zrna kao filtera ograničena s gornje strane i sprečena je kontaktna erozija. Ako ovaj uslov ne može da se ispunji, mogu se primeniti geosintetici kao razdvajajući, filtrirajući i odvodnjavajući element.

Osim uobičajenog odvodnjavanja, kod železničkih linija u zonama vodozaštite, u okviru posebnog projekta, primenjuju se i prostirke za zaptivanje u zaštitnom sloju planuma.

Pri tome, zaštitni sloj kao filter mora da ima vodopropustljivost veću od planuma. Brzina protoka ne sme biti toliko velika da čestice budu isprane, i to je filterska stabilnost (filterska uloga zaštitnog sloja), što je zadovoljeno ako je:

$$D_{15} \geq 4 \times d_{15}$$

To znači da prečnik zrna zastora D_{15} mora biti veći od četverostrukog prečnika zrna zaštitnog sloja d_{15} i da linija prosejavanja seče liniju AB (pogledati sliku 8). Ovim odnosom krupnoća zrna zaštitnog sloja je ograničena s donje strane, čime je obezbeđeno da je tlo ispod zaštićeno i efikasno odvodnjavano.

U slučaju da ovaj uslov nije ispunjen, može se koristiti dvoslojna zastorna prizma: gornji sloj krupniji - da odgovara zastoru a donji sitniji - da odgovara planumu (obično pesak), ali odnos ta dva sloja mora da

5.5.2 Protective layer drainage and filter stability roles

The protective layer material has to be of such grain mixture and density to prevent the soil fines migration and penetration in the ballast, while the water can pass through (separating effect of protective layer). This is achieved by the grains irregularity degree of $U = d_{60}/d_{10} \geq 15$ and by fulfilled the filter role of Terzaghi (Figure 8 [5]), with the known relation:

This limits the filter grain upwards and by this way the contact erosion is avoided. If this cannot be met, geosynthetic acting as a separating, filtering and draining element may be used.

By railway lines in water-protected zones, except the usual drainage system, the water-block mats would be inserted in the formation protective layer within the separate design.

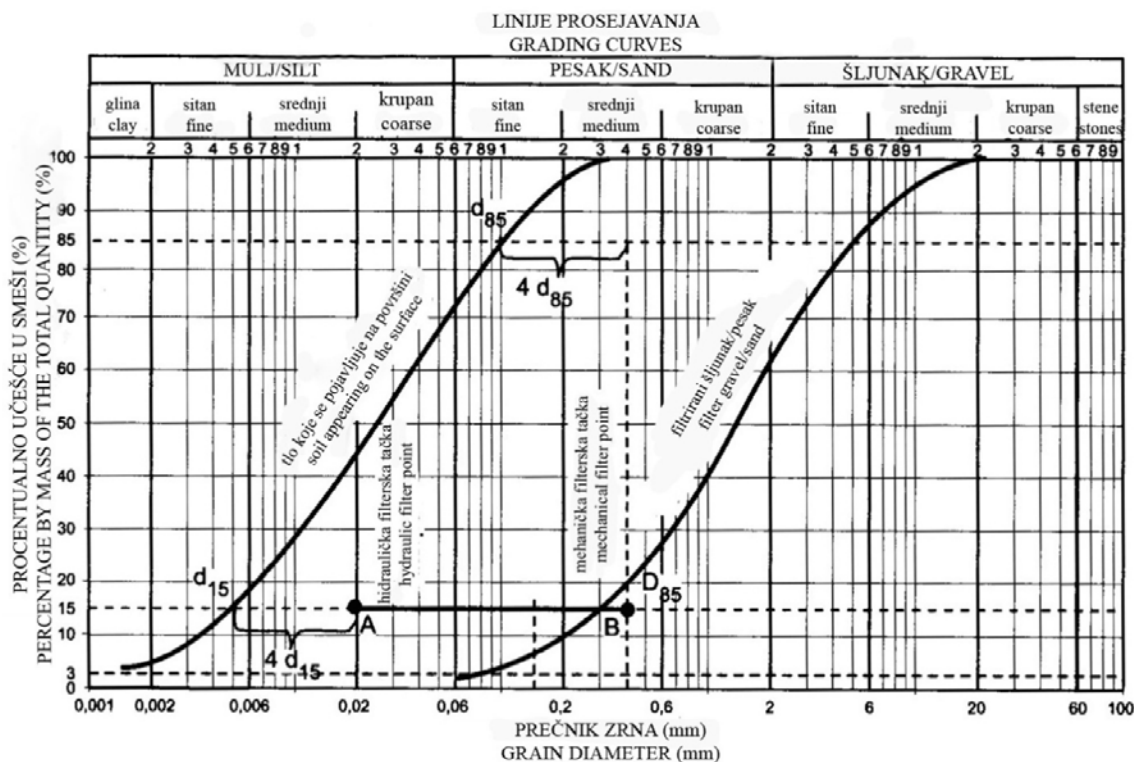
Furthermore, the protective layer as a filter must to have permeability to water better than formation. The flow rate must not be so high that soil particles are rinsed out and this is hydraulic filter stability (filtering effect of protective layer), which is fulfilled if:

This means that the grain size of ballast D_{15} must be larger than the fourfold grain size of formation protective layer d_{15} and the grading curve intersects the AB line (see Figure 8). The lower size of protective layer is limited by this relation and this guaranteed that the soil below is protected and drained effectively.

If this requirement may not be fulfilled, the two-layered protective layer can be used: on top coarse-grained to suit the ballast bed and on bottom fine-grained (usually sand) to suit formation, but the

zadovolji filtersko pravilo po Tercagiju. Pri tome, početna granulacija mora da ostane stabilna kroz vreme.

relationship between these two layers must fulfil the Terzaghi's rule. In addition, the initial grain sizes should be stable in time.



Slika 8. Filtersko pravilo po Tercagiju za zaštitni sloj planuma pruge
Figure 8. Filter role of Terzaghi for formation protective layer

5.5.3 Dimenzionisanje zaštitnog sloja za zaštitu od zamrzavanja

Problem zamrzavanja-odmrzavanja-omekšavanja tla ispod pruge dovodi do značajnih i neujednačenih vertikalnih pomeranja koloseka i ubrzaava njegovo propadanje. Otuda, ako je tlo osetljivo na zamrzavanje, treba sprovesti dimenzionisanje zaštitnog sloja za sigurnost tla od mraza. Pritom treba razlikovati potpunu i delimičnu sigurnost od mraza. Delimična sigurnost znači da je pri jakim zimama dozvoljeno ograničeno prodiranje mraza u tlo. Potpuna sigurnost od mraza propisana je za novoizgrađene pruge, pruge za velike brzine i pruge s kolosekom na čvrstoj podlozi. Za sve ostale pruge dozvoljava se delimična sigurnost od mraza.

Osetljivost na mraz zavisi od:

- indeksa zamrzavanja kao zbiru proizvoda dana s mrazom i temperature zamrzavanja tokom jednog perioda zamrzavanja;

- stepena neujednačenosti oblika zrna $U=d_{60}/d_{10}$,
- kapilarosti tla (kapilarnog penjanja vode).

Razlikuju se tri klase osetljivosti tla na zamrzavanje (dijagram na slici 9 [5]):

- F1 – neosetljivo na zamrzavanje;
- F2 – mala do srednja osetljivost tla na zamrzavanje;
- F3 – vrlo osetljivo na zamrzavanje.

5.5.3 Protective layer dimensioning as the frost protection

The freeze-thaw-softening track subsoil problem leads to the significant and differential vertical displacements of track and accelerates its deterioration. So, if the soil is frost sensitive, the protective layer must be dimensioned to the frost safety. There is a distinction between full and partial frost safety. Partial frost safety means that a limited frost penetration in the soil is admitted in severe winters. Full frost safety is prescribed for new lines, high-speed lines and ballastless tracks. For all other types of lines the partial frost safety is admissible.

The sensitivity to frost depends on:

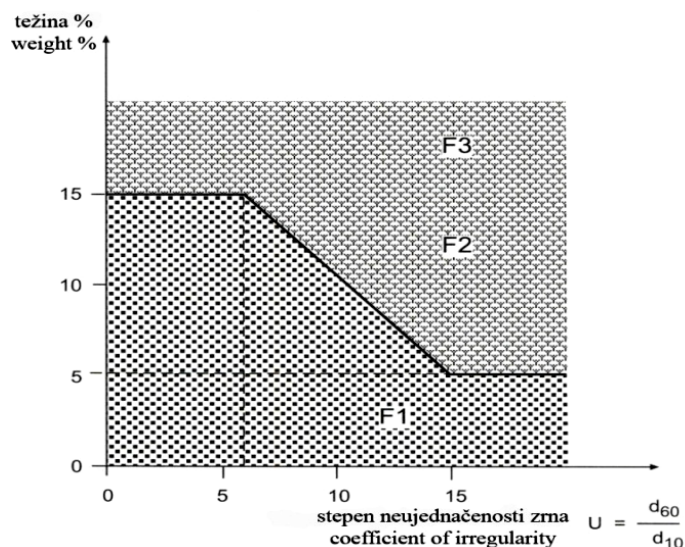
- frost index as the sum of the products of frost days and the frost temperature within a frost period,
- degree of irregularity,
- soil capillarity.

There are three classes of sensitivity to frost (Figure 9 [5]):

- F1 – no sensitivity to frost
- F2 – low to medium sensitivity to frost (silty and clayey gravel and sand, depending on their degree of irregularity and the share of fines with $d \leq 0.063\text{mm}$ in percents in weight)
- F3 – high sensitivity to frost

Malu, srednju do visoku osetljivost na zamrzavanje imaju muljevit i glinovit šljunak i pesak, zavisno od indeksa neujednačenosti U i procenta udela u težini finih čestica sa $d \leq 0,063\text{mm}$, prema slici 9.

Low, medium to high sensitivity to frost has silty and clayey gravel and sand, depending on their degree of irregularity and the share of fines with $d \leq 0,063\text{mm}$ in percents in weight according to Figure 9.



Slika 9. Klase osetljivosti tla na zamrzavanje
Figure 9. Classes of sensitivity to frost

Planum osetljiv na mraz takođe može da se zaštiti ugradnjom termoizolacionog sloja (toplotne brane). Za to su pogodni noseći slojevi od lakog betona gustoće oko 600 kg/m^3 debljine između 16 i 20 cm i ploče od tvrde penaste plastike gustoće $\geq 30 \text{ kg/m}^3$ debljine 5 do 10 cm sa slojem peska debljine oko 10 cm odozgo za zaštitu od proboja zrnima zastora, zavisno od konstrukcije koloseka i klimatskih uslova. Ta mera se može sprovesti u okviru čišćenja zastora specijalnim mašinama za čišćenje ili saniranje planuma. Kada se ove ploče kombinuju s geotekstilom, smanjuje se buka do 5 dB i prenos vibracija u donji stroj za 20 do 45%.

Kada zastor leži preko čvrste (betonske ili stenske) podloge, mora se predvideti međusloj za apsorpciju udara (npr. elastična podzastorna prostirka), kako bi se ublažilo njegovo sitnjenje pod točkovima šinskih vozila.

PVC folije debljine 2 mm mogu biti korisne kada je planum već raskvašen i jako zbijen, posebno pri dubokim zastornim vrećama.

5.6 Ugradnja geosintetičkih materijala

Geosintetički materijali treba da doprinose smanjenju naprezanja i deformacija i poboljšanju nosivosti i trajnosti zaštitnog sloja planuma. Oni se obično ugrađuju između tla i zaštitnog sloja ili sloja za zaštitu planuma od mraza, polažu se na zbijeni i isplanirani planum i pokrivaju zaštitnim materijalom. Oni treba da ispunjavaju mehaničke i hidrauličke zahteve i treba da spreče pumpanje finih čestica tla nagore.

Geosintetičke materijale treba primenjivati ako:

- filterna stabilnost ne postoji između tla i zaštitnog sloja;
- odvodnjavanje bočnim nagibom planuma tla nije dovoljno;

Formation sensitive to frost may also be protected by the insertion of thermal insulating layers (barriers). Supporting layers of foam concrete with density of about 600 kg/m^3 of thickness between 16-20cm and plastic foam slabs with density of $\geq 30 \text{ kg/m}^3$ of thickness between 5-10cm and protective sand layer on it of at least 10cm against crushing by the ballast, depending on the track structure and climatic conditions, are suitable for this. These works may be carried out during formation cleaning or improvement measures. When these frost protective layers are combined with geotextiles the noise level is decreased by least of 5dB and vibration transfer in substructure by 20-45%.

When the ballast lies on solid (concrete or rock) layers, shock-absorbing layers such as elastic mats against crushing the ballast grains under the train wheels, have to be provided.

PVC foils of thickness of 2mm can be useful, when the formation is already soaking and strongly consolidated, especially with dip ballast troughs.

5.6 Geosintetic products implementation

Geosintetics contribute to a reduction of stress and deformation, so as to improve and maintain the bearing capacity of formation protective layer. They are usually inserted between the subsoil and the formation or frost protective layer, on the compacted and regulated formation and covered by the protective materials. They have to fulfil the mechanical and hydraulic requirements and to prevent soil fines being pumped up.

Geosintetics should be applied if:

- filter stability between subsoil and protective layer do not exist,
- water drainage by cross fall of the earth formation

- postoje mesta sa smanjenom nosivošću planuma tla;
- treba poboljšati dugovremensko ponašanje donjeg stroja na jako opterećenim prugama.

Vrste geosintetika i njihove funkcije jesu:

- geotekstili: razdvajanje, filtracija, prenos, ojačanje;
- geomembrane: izolacija, razdvajanje, ojačanje;
- georešetke: ojačanje;
- geomreže: prenos;
- geosače: ojačanje;
- vezani (kombinovani) materijali.

Geosintetički materijali se uglavnom proizvode od poliestera, polipropilena ili polietilena.

U tabeli 7 skupljeni su zahtevi za geosintetičke materijale prema tehničkim uslovima isporuke na DB [5].

is not sufficient,

- there are areas with low bearing capacity in the earth formation,

- long-term behaviour of substructure on high-density lines has to be improved.

The types of geosynthetics and their functions are:

- Geotextiles: separation, filtration, transmission, reinforcement;
- Geomembranes: isolation, separation, reinforcement;
- Geogrids: reinforcement;
- Geonets: transmission;
- Geowebs: reinforcement;
- Geocomposites: combinations.

Geosynthetics are mainly of polyester, polypropylene or polyethylene.

Table 7 gives a summary of the requirements to be met by geosynthetics according to the technical terms of delivery of the DB [5].

Tabela 7. Zahtevi za geosintetike
Table 7. Requirements for geosynthetics

zahtevi requirements	masa mass [g/m ²]	najveća sila zatezanja maximum tensile force [kN/m]	najveća rastegljivost maximum elongation under tensile stress [%]	vodopropustljivost permeability to water [m/s]		sila proboja plunger puncture force [kN]
				k _v	k _h	
filter filter	100 - 250			≥ 10 ⁻³		≥ 1,0
razdvojno-filterski sloj zašt.sloja planuma pruge separating-filtering layer of the track formation protective layer	≥ 300	≥ 16	≥ 30 ≤ 40	≥ 10 ⁻³	≥ 10 ⁻³	≥ 2,0
razdvojno-filterski sloj planuma tla separating-filtering layer of earth formation	≥ 400 ≥ 200	≥ 16 ≥ 40	≤ 85 ≤ 25	≥ 10 ⁻³		≥ 2,0
ojačanje u zaštitnim slojevima reinforcement of formation protective layers		≥ 10	≤ 20			

Geotekstili se proizvode od mehanički, termički ili hemijski zbijanih izvlačenih vlakana. Oni su obično pleteni, tkani ili netkani, u obliku prostirki. Mogu da budu pleteni ili nepleteni. Geotekstil ima više mogućnosti za mesto ugradnje: između zastora i planuma, između zaštitnog sloja i podtla, između zastora i zaštitnog sloja, između novog i starog sloja zastora.

Jedna od glavnih primena geotekstila u koloseku jeste ispunjenje nekih od funkcija zaštitnog sloja, bilo da ga zamenjuje, bilo da ga dopunjuje. U tu svrhu, on treba prvo da izdrži napone pri rukovanju i ugradnji i sile kojima je izložen tokom eksploatacije, uključujući probode čestica zastora, istezanje da bi se prilagodio nepravilnostima terena, kao i da se odupre pokretima tla.

Geotekstili se obično umeću u kontaktnoj zoni, između zaštitnog sloja i podtla, kao razdvojni, filtrirajući i

Geotextiles are manufactured from mechanically, thermally or chemically compacted extruded fibers, which are usually needed, woven or no-woven, in the form of sheets. Geotextiles have the following alternatives for the installation place: between ballast and formation, between protective layer and subsoil, between ballast and protective layer, between the new and existing ballast layer.

One of the primary applications of geotextiles in track is to fulfil some of the functions of protective layer, either in place of or to assist it. For this purpose it will first withstand the handling and installation and the forces encountered in service, including puncturing by ballast grains, stretching to conform to the surface irregularities and to resist soil movements.

Geotextiles are usually inserted in contact area

odvodnjavajući element, ali ojačanje na zatezanje ima ograničenja. Što je manja nosivost tla, sve teži geotekstil treba da bude. Ispitivanja pokazuju da vlaknasti tkan geotekstil zadržava svoje dobre osobine i da na SNCF-u uveliko uspešno primenjuju teške geotekstile. Takođe, pokazalo se da termički ojačani geotekstili potpuno zaptivaju, delujući kao vodonepropusna membrana.

Vibracije od vozova moraju se uzeti u razmatranje kada se projektuje kolosečna noseća konstrukcija. Kritične vibracije nastale u geosintetičkim materijalima u srednjefrekventnom području jesu oko 40 Hz [5]. Jačina na zamor geotekstila i veza s tлом (smanjenje koeficijenta trenja) mogu biti izloženi nepovoljnom uticaju vibracija, posebno pri većim brzinama vozova.

Ugradnja geotekstila je mehanizovana u okviru postupaka obnove planuma i vrlo je ekonomična, jer smanjuje troškove održavanja i obnove koloseka, a štete od zamrzavanja tla se izbegavaju. Pri tome bi trebalo da je geotekstil bar 300 mm ispod dna praga da bi se izbeglo oštećenje pri podbijanju, kao i poremećaji od čišćenja zastora. Građevinska mehanizacija ne sme da se vozi preko geotekstila. Treba obezbediti glatku površinu na koju se polaže, bez oštih objekata i izloženost ultraljubičastom zračenju treba da je što je moguće kraća. Treba izbegavati duple slojeve geotekstila zbog mogućnosti da se razviju ravni klizanja između njih. Naposljetku, potrebno je obezbediti adekvatan sistem odvodnjavanja.

Geotekstili su često lakši za ugradnju od drugih metoda poboljšanja planuma, pa njihova upotreba može rezultirati smanjenjem početnih troškova. Istovremeno, geotekstili imaju ograničenu trajnost poboljšanja koja pružaju, pa se moraju periodično menjati, što je težak posao koji može prevazići dobit od njihove lake ugradnje. Dalje, geotekstili ne mogu ispuniti sve funkcije zaštitnog sloja, pa je potrebno pažljivo razmotriti sve aspekte da bi se donela odluka o najekonomičnijem rešenju [9].

Geomembrane su nepropusni, savitljivi plastični slojevi debljine od oko 0,15 mm do najviše 3 mm, bez otvora, od neoprena, polivinil-hlorida, hlorisanog polietilena ili drugih plastika. Radi ojačanja na zatezanje, vezuju sa za mrežu od najlona ili poliesteru, a površina im se ohrapavljuje da bi se povećao otpor smicanja s tлом. Osnovna funkcija im je sprečavanje prodiranja vode odozgo i vlage koja dolazi iz tla odozdo, kao i zadržavanje proticanja podzemne vode. Otuda je proces spajanja ivica – bilo na gradilištu ili tokom proizvodnje – kritičan, pa mnoge membrane propuštaju na šavovima. Geomembrane postavljaju se na planum, između dva sloja peska debljine najmanje 50 do 100 mm, koji ih štiti od probijanja; one ne smeju doći u kontakt sa zastorom.

Ozbiljan problem javio bi se ako je suvišna voda zarobljena ispod membrane, što može nastati od ponavljano opterećenja kod zasićenih tla ili kretanjem podzemne vode nagore. Tada bi ta voda morala da se odvede.

Membrane obezbeđuju i razdvajanje čestica tla. Zbog svoje čvrstoće na zatezanje imaju i izvesnu ulogu ojačanja, ali to nije njihova zahtevana funkcija.

Alternativni metod za proizvodnju vodonepropusnih barijera jeste prskanje bitumenom ili polimerom, ili noseće površine (obično nepleteni geotekstil), ili sloja peska na planumu. Da bi se sprečila mesta curenja, poželjan je zaštitni sloj peska preko bitumena. Površina

between protective layer and subsoil as separation, filtering and draining element, but for tensile reinforcement has limitations. The lower the soil bearing capacity, the heavier used geotextile. Experiments have shown that needled filament geotextiles maintain their good properties and the SNCF have successfully used heavier types for a long time. Also, they show that thermally bonded geotextiles got clogged and act as a water-proof membrane.

The vibrations from trains must be taken into consideration when design the track supporting structure reinforced by geotextiles. Critical vibration occurs in it at about medium frequencies of 40 Hz [5]. The geotextile fatigue strength and the interface between geotextile and soil (reduced friction coefficient) may be adversely influenced by vibrations, especially at higher running speeds.

Geotextiles are inserted by machines during formation renewal and are very economical, as reduce maintenance and renewal costs and prevent the occurrence of frost damage. In addition, the depth of geotextiles installation would be at least 300mm below the bottom of the sleepers to avoid damage during tamping and deteriorating from ballast cleaning. Construction equipment should not drive over the geotextiles. Smooth surface on which to lay it, without sharp objects, should be prepared and the exposure time to ultraviolet radiation as short as possible. Double layers of geotextiles should be avoided because of the possibility of slip planes between them. Finally, an adequate drainage system should be established.

Geotextiles are often easier to install from other improvement measures, so their use may result in a lower initial costs. On the other hand, geotextiles have a limited duration of improvement and have to be replaced periodically, which is a difficult work which may offset the benefits of their ease installation. Further, it cannot fulfil all functions of protective layer, so the careful decision is required for the most economical solution [9].

Geomembranes are impermeable, flexible plastic sheets in thickness from 0.15mm to at least 3mm without holes, made from neoprene, polyvinyl chloride, polyethylene or other plastics. For higher strength they are bonded to nylon or polyester mesh, and for increased shearing resistance with soil their surface is roughened. The main applications are to prevent infiltration of water from the surface, to block water coming from the soil below and to interrupt the flow of ground water. So, the edges connecting, either at the situ or during fabrication is considered critical as the many of them leaking at borders. The membrane is placed at formation, between two sand layers of at least 50-100mm, which protected them from puncturing as they must not come in contact with ballast particles.

Severe problem will occur if excess water is trapped beneath the membrane, that result from repeated loading by saturated soils or upward flow of ground water. Then, that water must be drained away.

Membranes also provide the soil separation. Although they have tensile strength and therefore certain reinforcement function, this is not its demanded function.

An alternative method for producing water impermeable barrier is by spraying bitumen or polymer, either the supporting surface (usually no-woven geotextil) or sand layer on formation. To avoid the leakage points, a protective sand layer over bitumen is advisable. The

mora biti pravilno oblikovana za oticanje vode pre prskanja, da se ne bi stvarali vodeni džepovi iznad premaza. Nepovoljan efekat je zarobljena voda ispod premaza.

Georešetke nastaju razvlačenjem sintetičkog materijala ili spajanjem niti u nizove molekula polimera s velikom jačinom i krutošću. One se utiskuju u mešavinu čestica unutar zaštitnog sloja i deluju na rasprostiranje opterećenja i smanjenje naprezanja. Na taj način, one premošćavaju područja pruge male nosivosti i povećaju njenu zateznu nosivost u svojoj ravni kada su deformacije tla zatežuće. Dimenzije okaca mreže su između $1,67 \times d_{80}$ i 40 mm.

Geomreže čine kanali sa strujanjem, koji se sastoje od šupljeg plastičnog jezgra obmotanog geotekstilom. Voda iz tla prolazi kroz geotekstil i protiče duž šupljeg jezgra, tako da geomreža ima funkciju prenosne drenaže. Geomreže moraju da budu dovoljno nosive da izdrže protok kroz kanale pod pritiskom tla.

Geosaće čine plastične ćelije otvorene i ka gore i ka dole, ispunjene zrnastim tlom. Svojom čvrstoćom na istezanje, formiraju ojačan sloj tla koji nosi opterećenje.

Vezani materijali su kombinovani razni geosintetički materijali, tako da se istovremeno postiže više efekata. Na primer, za ojačanje je najbolje polagati georešetku sa geotekstilom, čime se obezbeđuje održavanje nosivosti i rastavljanje filtersko delovanje pri promenljivim hidrološkim zahtevima. Pri upotrebi ovakvog geosintetičkog materijala s višestrukim dejstvom, može se smanjiti debljina sloja za zaštitu od mraza za 10 cm.

6 ZAKLJUČAK

Glavna funkcija planuma pruge jeste da obezbedi stabilnu podlogu konstrukciji koloseka. Da bi to ispunio, oblici propadanja se moraju izbeći i planum pruge – kao prvi sloj ispod gornjeg stroja pruge – mora da se unapredi. Savremena praksa projektovanja pruga i planiranja održavanja zanemaruju tu činjenicu. Često se odluke donose na osnovu iskustva. Prilika da se napravi greška postoji zbog velike različitosti uslova na terenu i promena u saobraćajnim zahtevima kroz vreme.

Iz ovog pregleda mogućnosti unapređivanja planuma pruge, može se zaključiti da je odluka o primenjenoj metodi rezultat jednog procesa. Prvo, mora se odrediti uzrok problema u koloseku pravilnim istraživanjem planuma – na terenu i pomoću laboratorijskih opita i analiza. Moguće funkcije i primenljivost postojećih mogućnosti treba proceniti. To je ključni korak i predstavlja izazov za građevinskog inženjera stručnjaka za železnicu, zbog nedostatka uvida u trenutno stanje u toj oblasti. Posle toga, treba sprovesti uporednu ekonomsku analizu tih mogućnosti. Za najbolju metodu, pošto obično prethodna iskustva na istoj deonici koloseka ne postoje, preporučuje se da se sprovedu opiti na terenu. Po snimanju karakteristika pruge, u dovoljno dugom periodu, rezultate treba proceniti. Veoma je korisno dokumentovati rezultate izabrane metode poboljšanja planuma pruge za buduću primenljivu preporuku.

Potrebu poznavanja stanja planuma pruge i mogućnosti sprovođenja postupaka poboljšanja trebalo bi da prepoznaju i Železnice Srbije, jer će bez toga trend porasta troškova održavanja i obnove pruga biti sve očigledniji.

surface must be first properly shaped for shedding water before spraying, to avoid developing water-pockets above coating. The adverse effect again is of water trapping beneath the coating.

Geogrids originate from strands stretched to align the long-chain polymer molecules for high strength and stiffness. The grids interlock with the grain mixture within the protective layer to create the load-distributing and tension-reducing effects. So, they bridge areas of poor bearing capacity and in general increase tensile reinforcement in their plane when the soil strains are extensional. The mesh size is between $1.67 \times d_{80}$ and 40mm.

Geonets are flat flow channels consisting of a hollow plastic core wrapped with a geotextile. Water from the soil will pass through the geotextile and flow along the hollow core and perform its function as a transmission drain. Geonet must be strong enough to maintain its flow channel under pressure from the soil.

Geowebbs are plastic cells with open top and bottom, filled with granular soil. Through their tensile strength they form a load bearing reinforced soil layer.

Geocomposites are combinations of different geosynthetics, attaining at the same time more effects. For example, for reinforcement application it is best to lay the geogrids bonded to a geotextile to provide better reinforcement capability and separating filter effect under the changeable hydraulic requirements. By using such geosynthetic materials with multipurpose effect, the frost protective layer may be reduced by 10cm.

6 CONCLUSION

The main track formation function is to provide a stable platform for the track structure. To do this, the failure modes must be avoided and the track formation as the first layer under the track superstructure must be improved. The current practice of railway track design and maintenance planning ignore this fact. Usually, the decisions have been made on the empirical bases. The opportunity for error exists because of the large variety of field conditions and the changes in track service demands over the time.

From this review of track formation improvement possibilities, it can be decided that the decision about the applied method is the result of a process. First, the cause of the track problem is determined by proper investigations of formation in field and with help of laboratory tests and analysis. Possible functions and the applicability of existing improvement alternatives may be evaluated. This is the key step and presents a challenge to the railway track engineer, because of the lack of state-of-the-art in that field. Afterwards, comparative economic analysis of these alternatives should be carried out. For the best alternatives, as usually the prior experiences at the same track section lack, it is recommended to conduct the field trials. After monitoring the track performance for a sufficient time, the results should be accessed. It is very useful to document the results of the selected improvement alternatives of track formation for the future applicable recommendation.

The need for considering conditions of track formation and its improvement alternatives may be also recognized at Serbian Railways, because in contrary the increasing trend of track maintenance and renewal costs would be more evident.

7 LITERATURA REFERENCES

- [1] Esveld, C.: Modern Railway Track, TU Delft, 2001.
- [2] Henn, W.: Oberbau und Erdbau in gemeinsamer Verantwortung für die Fahrwegerhaltung, ETR, 1/1988.
- [3] Jay, T.: Improving the performance of geosynthetic materials, IRJ 3/2002
- [4] Lichtberger, B.: Stand der mehanisierten Planumverbesserung, Eisenbahningenieur 5/1992.
- [5] Lichtberger, B.: Track Compendium, Telzloff Verlag, Hamburg, 2005
- [6] Martinek, K., Igl, G.: Vorschrift für Erdbauwerke (Neuherausgabe der DS 836), Eisenbahningenieur, 9/1982.
- [7] Matthews, V.: Bahnbau, B. G. Teubner, Leipzig 2002.
- [8] Pravilnik 315 o održavanju donjeg stroja pruga JŽ, 1970.
- [9] Selig, E., Waters, J.: Track geotechnology and substructure management, Thomas Telford, London, 1994.
- [10] Tomičić-Torlaković, M.: Održavanje železničkih pruga, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.

REZIME

MOGUĆNOSTI POBOLJŠANJA PLANUMA ŽELEZNIČKE PRUGE

Mirjana TOMIČIĆ-TORLAKOVIĆ

Odgovor na opterećenje vozom je pod snažnim uticajem karakteristika železničke pruge, odnosno složene saradnje njenih komponenti. Donji stroj železničke pruge se mnogo manje istražuje, iako bitno utiče na propadanje koloseka, kao i na troškove održavanja i obnove koloseka. Svojstva komponenti donjeg stroja pruge su mnogo više promenljiva i teža za određivanje nego komponenti gornjeg stroja. U prvom delu rada je objašnjen značaj osobina planuma pruge za karakteristike koloseka. U slučajevima gde je planum isuviše slab, visoki trošak održavanja koloseka uslovljava poboljšanje njegovog stanja.

Rad sadrži mogućnosti poboljšanja planuma pruge podeljene u šest grupa: promene osobina planuma na terenu, rekonstrukcija i zamena, primena asfalt-betona, stabilizacija klizišta, ugradnja zaštitnog sloja i primena geosintetičkih proizvoda.

U zaključku je objašnjen proces procene najpogodnijeg metoda poboljšanja planuma koloseka.

Svrha ovog rada je da obezbedi osnovu za projektovanje poboljšanja planuma pruge, koje može rezultirati železničkim kolosekom sa optimalnim održavanjem i pristupačnošću za saobraćaj.

Ključne reči: Kolosek, planum pruge, mogućnosti poboljšanja, kapacitet nosivosti, zbijanost, odvodnjavanje, filtracija, zaštitni sloj, geosintetici

SUMMARY

IMPROVEMENT ALTERNATIVES FOR RAILWAY TRACK FORMATION

Mirjana TOMIČIĆ-TORLAKOVIĆ

The performance of the railway track system results from the complex interaction of its components in response to train loading. The railway track substructure has been given much less consideration, even though it has a major influence on the track deterioration and as a consequence on the costs of track maintenance and renewal. The properties of the substructure components are much more variable and difficult to determine than those of the superstructure. The importance of the track formation properties for track performance is discussed in the first part of the paper. In cases where the formation is too weak, the resulting high cost of track maintenance may dictate the need to improve the formation conditions.

The paper contains the alternatives of track formation improvements separated in six groups: altering formation properties in place, reconstruction and replacement, asphalt-concrete application, slip stabilization, insertion of protective layer and geosintetics implementation.

In the summary the evaluation process of proper formation improvement method is explained.

The goal of the paper is to provide the basis for track formation improvement design, which may result in railway tracks with optimum maintenance effort and traffic operability.

Key words: Track, track formation, improvement alternative, bearing capacity, consolidation, drainage, filtration, protective layer, geosintetics

UPUTSTVO AUTORIMA*

Prihvatanje radova i vrste priloga

U časopisu Materijali i konstrukcije štampaće se neobjavljeni radovi ili članci i konferencijska saopštenja sa određenim dopunama ili bez dopuna, prema odluci Redakcionog odbora, a samo izuzetno uz dozvolu prethodnog izdavača prihvaćaju se i objavljeni rad. Vrste priloga autora i saradnika koji će se štampati su: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi, stručni radovi, konferencijska saopštenja (radovi sa naučno-stručnih skupova), kao i ostali prilozi kao što su: prikazi objekata i iskustava - primeri, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Originalni naučni rad je primarni izvor naučnih informacija i novih ideja i saznanja kao rezultat izvornih istraživanja uz primenu adekvatnih naučnih metoda. Dobijeni rezultati se izlažu kratko, jasno i objektivno, ali tako da poznavalac problema može proceniti rezultate eksperimentalnih ili teorijsko numeričkih analiza i tok razmišljanja, tako da se istraživanje može ponoviti i pri tome dobiti iste ili rezultate u okvirima dopuštenih odstupanja, kako se to u radu navodi.

Prethodno saopštenje sadrži prva kratka obaveštenja o rezultatima istraživanja ali bez podrobnih objašnjenja, tj. kraće je od originalnog naučnog rada. U ovu kategoriju spadaju i diskusije o objavljenim radovima ako one sadrže naučne doprinose.

Pregledni rad je naučni rad koji prikazuje stanje nauke u određenoj oblasti kao plod analize, kritike i komentara i zaključaka publikovanih radova o kojima se daju svi neophodni podaci pregledno i kritički uključujući i sopstvene radove. Navode se sve bibliografske jedinice korišćene u obradi tematike, kao i radovi koji mogu doprineti rezultatima daljih istraživanja. Ukoliko su bibliografski podaci metodski sistematizovani, ali ne i analizirani i raspravljani, takvi pregledni radovi se klasifikuju kao stručni pregledni radovi.

Stručni rad predstavlja koristan prilog u kome se iznose poznate spoznaje koje doprinose širenju znanja i prilagođavanja rezultata izvornih istraživanja potrebama teorije i prakse. On sadrži i rezultate razvojnih istraživanja.

Konferencijsko saopštenje ili rad saopšten na naučno-stručnom skupu koji mogu biti objavljeni u izvornom obliku ili ih autor, u dogovoru sa redakcijom, bitno preradi i proširi. To mogu biti naučni radovi, naročito ako su saopštenja po pozivu Organizatora skupa ili sadrže originalne rezultate prvi put objavljene, pa ih je korisno uz određene dopune učiniti dostupnim široj stručnoj javnosti. Štampaće se i stručni radovi za koje Redakcioni odbor oceni da su od šireg interesa.

Ostali prilozi su prikazi objekata, tj. njihove konstrukcije i iskustava-primeri u građenju i primeni različitih materijala, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Autori uz rukopis predlažu kategorizaciju članka. Svi radovi pre objavljivanja se recenziraju, a o prihvatanju za publikovanje o njihovoj kategoriji konačnu odluku donosi Redakcioni odbor.

Da bi se ubrzao postupak prihvatanja radova za publikovanje, potrebno je da autori uvažavaju Uputstva za pripremu radova koja su navedena u daljem tekstu.

Uputstva za pripremu rukopisa

Rukopis otkucati jednostrano na listovima A-4 sa marginama od 31 mm (gore i dole) a 20 mm (levo i desno), u Wordu fontom Arial sa 12 pt. Potrebno je uz jednu kopiju svih delova rada i priloga, dostaviti i elektronsku verziju na navedene E-mail adrese, ili na CD-u. Autor je obavezan da čuva jednu kopiju rukopisa kod sebe zbog eventualnog oštećenja ili gubitka rukopisa.

Od broja 1/2010. prema odluci Upravnog odbora Društva i Redakcionog odbora, radovi sa pozitivnim recenzijama i prihvaćeni za štampu, publikovaće se na srpskom i engleskom jeziku.

Svaka stranica treba da bude numerisana, a optimalni obim članka na jednom jeziku, je oko 16 stranica (30000 slovnih mesta) uključujući slike, fotografije, tabele i popis literature. Za radove većeg obima potrebna je saglasnost Redakcionog odbora.

Naslov rada treba sa što manje reči (poželjno osam, a najviše do jedanaeset) da opiše sadržaj članka. U naslovu ne koristiti skraćenice ni formule. U radu se iza naslova daju ime i prezime autora, a titule i zvanja, kao i ime institucije u podnožnoj napomeni. Autor za kontakt daje telefone, faks i adresu elektronske pošte, a za ostale autore poštansku adresu.

Uz sažetak (rezime) od oko 150 do 200 reči, na srpskom i engleskom jeziku daju se ključne reči (do deset). To je jezgrovit prikaz celog članka i čitaocima omogućuje uvid u njegove bitne elemente.

Rukopis se deli na poglavlja i potpoglavlja uz numeraciju, po hijerarhiji, arapskim brojevima. Svaki rad ima uvod, sadržinu rada sa rezultatima, analizom i zaključcima. Na kraju rada se daje popis literature.

Kod svih dimenzionalnih veličina obavezna je primena međunarodnih SI mernih jedinica.

Formule i jednačine treba pisati pažljivo vodeći računa o indeksima i eksponentima. Autori uz izraze u tekstu definišu simbole redom kako se pojavljuju, ali se može dati i posebna lista simbola u prilogu.

Prilozi (tabele, grafikoni, sheme i fotografije) rade se u crno-belom tehničkom formatu koji obezbeđuje da pri smanjenju na razmere za štampu, po širini jedan do dva stupca (8cm ili 16.5cm), a po visini najviše 24.5cm, ostanu jasni i čitljivi, tj. da veličine slova i brojeva budu najmanje 1.5mm. Originalni crteži treba da budu kvalitetni i u potpunosti pripremljeni za presnimavanje. Mogu biti i dobre, oštre i kontrastne fotokopije. Koristiti fotografije, u crno-belom tehničkom, na kvalitetnoj hartiji sa oštrim konturama, koje omogućuju jasnu reprodukciju. Skraćenice u prilogima koristiti samo izuzetno uz obaveznu legendu. Prilozi se posebno označavaju arapskim brojevima, prema redosledu navođenja u tekstu. Objašnjenje tabela daje se u tekstu.

Potrebno je dati spisak svih skraćenica korišćenih u tekstu.

U popisu literature na kraju rada daju se samo oni radovi koji se pominju u tekstu. Citirane radove treba prikazati po azbučnom redu prezimena prvog autora. Literaturu u tekstu označiti arapskim brojevima u uglastim zagradama, kako se navodi i u Popisu citirane literature, napr [1]. Svaki citat u tekstu mora se naći u Popisu citirane literature i obrnuto svaki podatak iz Popisa se mora navesti u tekstu.

U Popisu literature se navode prezime i inicijali imena autora, zatim potpuni naslov citiranog članka, iza toga sledi ime časopisa, godina izdavanja i početna i završna stranica (od - do). Za knjige iza naslova upisuje se ime urednika (ako ih ima), broj izdanja, prva i poslednja stranicapoglavlja ili dela knjige, ime izdavača i mesto objavljivanja, ako je navedeno više gradova navodi se samo prvi po redu. Kada autor citirane podatke ne uzima iz izvornog rada, već ih je pronašao u drugom delu, uz citat se dodaje «citirano prema...». Neobjavljeni članci mogu se pominjati u tekstu kao «usmeno saopštenje».

Autori su odgovorni za izneseni sadržaj i moraju sami obezbediti eventualno potrebne saglasnosti za objavljivanje nekih podataka i priloga koji se koriste u radu.

Ukoliko rad bude prihvaćen za štampu, autori su dužni da, po uputstvu Redakcije, unesu sve ispravke i dopune u tekstu i prilogima.

Za detaljnija tehnička uputstva za pripremu rukopisa autori se mogu obratiti Redakcionom odboru časopisa.

Rukopisi i prilozi objavljenih radova se ne vraćaju. Sva eventualna objašnjenja i uputstva mogu se dobiti od Redakcionog odbora.

Radovi se mogu slati i na e-mail: folic@uns.ac.rs ili miram@uns.ac.rs i dimk@ptt.rs

Web sajt Društva i časopisa: www.dimk.rs

* Uputstvo autorima je modifikovano i treba ga u pripremi radova slediti.

Izdavanje časopisa "Građevinski materijali i konstrukcije" finansijski su pomogli:



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

**MINISTARSTVO ZA NAUKU I TEHNOLOŠKI
RAZVOJ SRBIJE**



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



**DEPARTMAN ZA GRAĐEVINARSTVO
FAKULTET TENHIČKIH NAUKA NOVI SAD**



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET CRNE GORE
GRAĐEVINSKI FAKULTET - PODGORICA**