



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Jakub Rubint

Autoreferát dizertačnej práce:

Optimalizovaný návrh roboticky viazanej betonárskej výstuže

na získanie akademického titulu: philosophiae doctor – PhD.

v doktorandskom študijnom programe: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore: stavebníctvo

forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava, 31.05.2022

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Jakub Rubint

Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Norbert Jendželovský, PhD

Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti:

prof. Ing. Jiří Kala Ph.D

Ústav stavební mechaniky
Fakulta stavební, VUT v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

doc. Ing. Róbert Sonnenschein, PhD.

Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Ing. Miroslav Šimonovič, PhD.

Externý spolupracovník
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 06. 06. 2022

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 24. 08. 2022 o 10:30 h na

Katedre stavebnej mechaniky (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan fakulty

Abstrakt

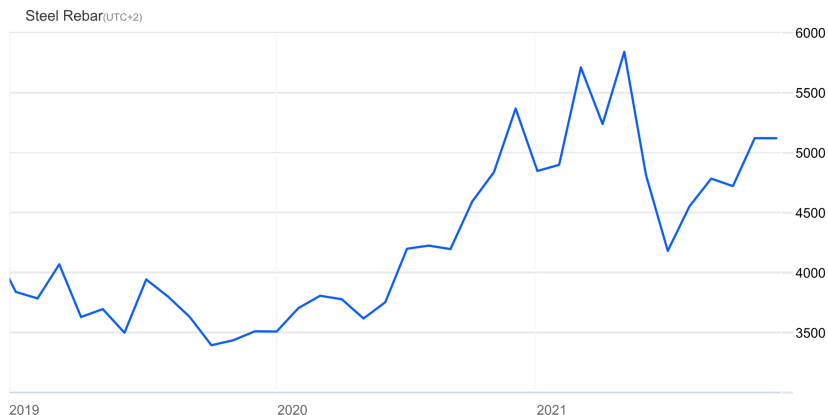
Dizertačná práca sa venuje optimalizácii návrhu betonárskej výstuže, viazanej pomocou portálového robota *Perseus* vyvinutého firmou *XEUS - Civil Engineering Robotics s.r.o.*, kde som sa takisto aktívne podieľal na jeho návrhu. Práca sa začína popisom histórie, vývoja a súčasného stavu technológií vystužovania železobetónových prvkov. Následne je popísaná metodika návrhu veľkoformátových optimalizovaných sietí do plošných železobetónových konštrukčných prvkov, ktoré môžu byť automaticky viazané pomocou robota, či už priamo na stavbe alebo v závode na výrobu prefabrikátov. Ďalšia časť práce sa venuje využitiu numerickej metódy konečných prvkov na získanie podkladov pre tieto siete. V poslednej časti práce je popísaný počítačového programu na riešenie doskových konštrukčných prvkov, ktorého výstupom je optimalizovaný návrh roboticky viazanej betonárskej výstuže.

Obsah

Úvod	4
Súčasný stav problematiky	5
Ciele záverečnej práce	5
Ideový návrh portálového robota	6
Veľkoformátové optimalizované siete	7
Využitie MKP pri návrhu veľkoformátových optimalizovaných sietí	7
Program na návrh veľkoformátových optimalizovaných sietí	8
Veľkoformátové optimalizované siete	9
Záver	17
Použitá literatúra	19
Zoznam publikovaných prác autora	20

1 Úvod

Svetové udalosti, ako bolo vypuknutie celosvetovej pandémie na začiatku roku 2020 alebo prebiehajúca vojna na Ukrajine, viedli k výrazným zvýšeniam cien stavebných materiálov (obrázok 1.1). Výroba a preprava betonárskej výstuže, ako aj ostatných stavebných materiálov, má výrazný ekologický a environmentálny dopad. Tieto skutočnosti si vyžadujú znižovanie spotreby stavebných materiálov, čo však pri uvážení nedostatku kvalifikovaného personálu na stavbách nie je jednoduchá úloha. Jedným z možných riešení je automatizácia v stavebníctve, ktorá je v tom stavebnom, na rozdiel od ostatných odvetví priemyslu, len na začiatku. Práve optimalizácii návrhu výstuže s uvážením automatizácie jej viazania sa venuje táto práca.



Obr. 1.1 Vývoj ceny betonárskej výstuže v čínskych Yuanoch za tonu. Obdobie od začiatku pandémie COVID-19 až súčasnosť (čas písania práce)

V úvode práce je zhrnutá história a súčasnosť vystužovania železobetónových konštrukčných prvkov spolu s prehľadom organizácií venujúcich sa automatizácii vystužovania vo svete. V práci je navrhnutý koncept vystužovania pomocou veľkoformátových sietí, ktoré slúžili ako podklad pre návrh portálového robota. Následne je popísaná metodika návrhu takejto výstuže a jej optimalizácia. Na základe teórie uvedenej v práci je navrhnutý jednoduchý program na báze metódy konečných prvkov, ktorého výstupom sú podklady pre návrh veľkoformátových optimalizovaných sietí. Tie budú viazané automaticky pomocou portálového robota *Perseus*.

2 Súčasný stav problematiky

S produkciou až 38% celosvetových uhlíkových emisií [01] (UNEP, 2019), stavebný priemysel patrí medzi hlavný objekt záujmu v rámci boja proti klimatickej zmene. V kontexte strategickej vízie Európskej komisie pre dosiahnutie klimaticky neutrálneho hospodárstva do roku 2050, Medzinárodná agentúra pre energetiku (International Energy Agency, IEA) odhaduje, že emisie priamo vyplývajúce zo stavebnej činnosti musia klesnúť o 50% do roku 2030. Podľa Nigela Toppinga, vysokého predstaviteľa pre zachovanie klímy na COP26 „Musíme prehodnotiť využitie betónu a ocele. To, či sa uhlíkovo neutrálna oceľ a betón stanú materiálmi budúcnosti, bude závisieť od skutočnosti, ako rýchlo sa tieto odvetvia inovujú tvárou v tvár novým a prevratným technológiám.“ Práve optimalizácia návrhu a realizácie v stavebníctve prináša zníženie spotreby materiálov so značnou uhlíkovou stopou, ktoré sú však v zmysle zachovania vysokej únosnosti a životnosti konštrukcií momentálne nenahraditeľné – tieto materiály sú betón a oceľ.

V rozpore so zámerom Európskej komisie, aktuálna ekonomická situácia v Európe a takisto aj na území Slovenskej republiky, vedie k zhoršeniu efektivity využívania materiálov. Nedostatok kvalifikovaných robotníkov (viazačov betonárskej výstuže) ako aj vysoké nároky na rýchlosť výstavby zapríčinili, že sa realizátori častokrát prikláňajú k menej efektívnym návrhom vystužovania železobetónových konštrukcií podľa tradičných postupov, s vysokou spotrebou materiálov a so značnými prepravnými vzdialenosťami.

Podľa štatistiky Eurostat z roku 2020 [02], stavebný priemysel s vyše 700 úmrtiami ročne zodpovedá až za jednu pätinu všetkých smrteľných nehôd na pracovisku, a teda je najnebezpečnejším pracovným odvetvím v Európe.

Automatizácia a viazanie výstuže pomocou robotov

V čase písania tejto práce sa danej problematike venuje len súkromný sektor. Známe sú firmy Rebartek AS z Nórska a projekt IronBot americkej firmy Advanced Construction Robotics.

Prvý spomínaný projekt je gantry systém so zavesenými robotickými ramenami, ktorý je predprogramovaný tak, aby z vopred pripravenej výstuže poskladal a naviazal armovacie koše z firemného katalógu. Systém tak bude vhodný hlavne pri prefabrikácii.

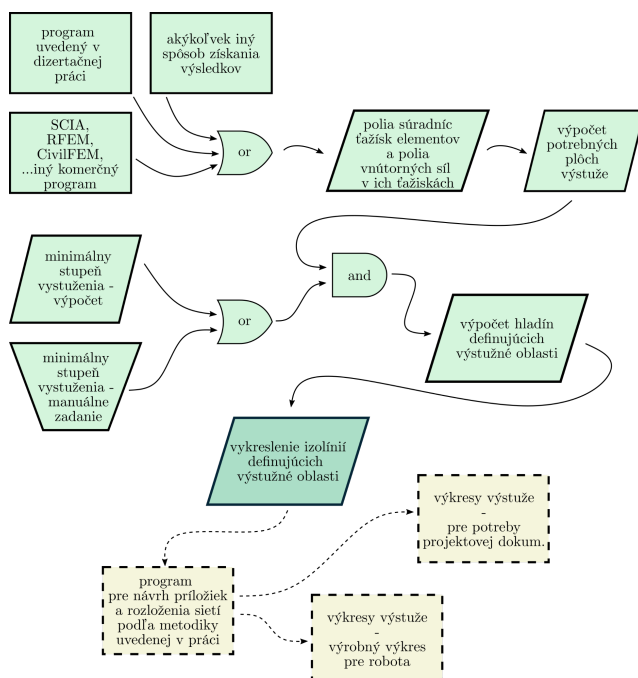
Druhý projekt je v čase písania tejto práce v procese vývoja. Má ísť o veľký portál na koľajniciach, ktorý ukladá výstuž do dosiek mostov. Je možné predpokladať, že technológia poskytne malú variabilitu a bude relevantná pre dlhé rovné úseky mostov.

3 Ciele záverečnej práce

Ciele práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- koncept automatizácie vystužovania železobetónových dosiek,
- ideový návrh robota na výrobu veľkoformátových výstužných sietí do plošných železobetónových konštrukcií,
- **vypracovanie metodiky návrhu optimalizovaných veľkorozmerných sietí,**
- **softvér na výpočet podkladov pre návrh roboticky viazanej výstuže**
- interface medzi stavebníctvom (optimálny návrh výstuže) a robotizáciou (pokyny pre robotické pracovisko)

Výstupom programu sú výstužné oblasti definované izolíniami (obr. 8.4 a 8.5). Na základe týchto podkladov bude automaticky navrhnutá výstuž vo forme veľkoformátových sietí. Výstupom bude kladačský plán sietí spoločne s výrobnými výkresmi jednotlivých sietí (v diagrame na obrázku 3.1) sú tieto úlohy reprezentované žltou farbou a môžu byť riešené v budúcnosti v nadväznosti na túto dizertačnú prácu).



Obr. 3.1 Vývojový diagram

4 Koncept automatizácie vystužovania

Vzhľadom na fakt, že automatizácia ako taká v tomto sektore stavebného priemyslu prakticky neexistuje, je nutné si stanoviť rozumné a hlavne splniteľné ciele. Bolo teda prirodzené, že pre tento účel boli vybrané také konštrukčné prvky, ktoré sú, čo sa vystuženia týka, jednoduché. Zároveň však ich vystuženie tvorí najväčšiu časť z celkovej výstuže použitej v typických monolitických konštrukciách pozemných stavieb. Ide o 2D konštrukčné prvky. Konkrétne o výstuž, ktorá môže byť vyhotovená vo forme sietí. Nejde však o bežné, typizované zvárané siete, ale o optimalizované unikátne siete.

Zaužívané spôsoby vyhotovenia výstuže

Ako konceptuálny model pre túto úlohu je výstuž pri spodnom povrchu stropných železobetónových dosiek. Práve táto výstuž tvorí najväčšiu časť výstuže použitej v bežných monolitických konštrukciách pozemných stavieb. Samotný návrh takejto výstuže môžeme rozdeliť podľa koncepcie jej vyhotovenia na:

- viazanú výstuž,
- výstuž zváranými sieťami s príložkami.

Porovnanie zaužívaných spôsobov (prípadová štúdia)

Prípadová štúdia bola vykonaná na jednom z veľkých developerských projektov na okraji Bratislavy. Vybraný objekt bol zvolený ako prípadová štúdia práve preto, že realizačný projekt uvažoval s výstužou vo viazanej forme. Po vysúťžení realizácie si realizátor na vlastné náklady dal prepracovať výstuž z viazanej formy na výstuž zváranými sieťami s príložkami.

Pri druhej alternatíve vystuženia došlo takmer k 16% zvýšeniu spotreby materiálu. Kompenzáciou pre realizátora bola zvýšená rýchlosť výstavby a taktiež ušetrené mzdové náklady.

Výstuž viazaná robotmi

Aby si výstuž viazaná robotmi našla uplatnenie v tak rigidnom priemyselnom odvetví, ako je stavebníctvo, je nutné, aby kombinovala výhody viazanej výstuže s výhodami vystužovania pomocou sietí. Základ tejto výstuže tvoria veľkoformátové siete.

Koncept veľkoformátových sietí

Veľkoformátové siete sú najjednoduchším a zároveň najefektívnejším spôsobom navrhovania výstuže plošných železobetónových prvkov viazaných pomocou robotov. Presunom výroby sietí priamo na stavenisko je možné zväčšiť ich rozmery,

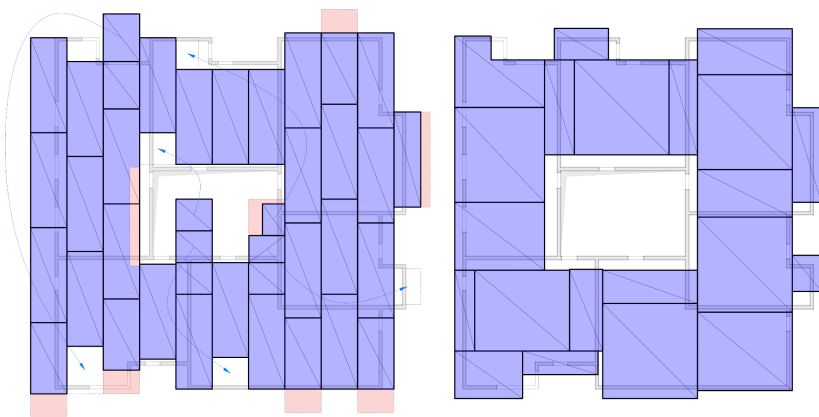
ktoré už nebudú obmedzované ich prepravou. Eliminácia nutnosti prepravy sietí na stavenisko zároveň zmierni dopad na životné prostredie.

Ako cieľ bol stanovený rozmer sietí 6x6 metrov. Samotné siete budú vyrábané z kotúčov betonárskej výstuže. Výstuž v kotúči bude prechádzať cez tzv. vyrovnávačku betonárskej výstuže, ktorá prút odstrihne v presnej vzdialenosti a posunie do zásobníka. Keďže prúty výstuže môžu byť variabilnej dĺžky, je tak možné vyhotoviť siete atypických rozmerov a tvarov, či sietí s otvormi. Bližší opis samotného zariadenia je v kapitole 4. Pri takto vyrobených sieťach je prakticky eliminovaný odpad, ktorý vyplýva z nutnosti rezania vopred zváraných sietí.

Kontrolný návrh a prepočet bol vyhotovený ako alternatíva k vystuženiu spomínaného objektu. Na typickom podlaží bol porovnávaný hlavný raster výstuže vyhotovený v podobe zváraných sietí.

Na obrázku 4.1 (vľavo) je zobrazená celková plocha zváraných sietí. Išlo o $469.2m^2$ zváraných sietí typu, pri ktorom prekryv sietí bol $59.2m^2$ (12.6%) z celkovej plochy. Červenou farbou je znázornená tá časť sietí, ktorá musela byť odstrihnutá a tvorila tak odpad. Odpad bol $27.2m^2$ (5.8%) z celkovej plochy sietí.

Pri použití veľkoformátových atypických sietí sa redukuje prekryv sietí na $34.1m^2$, čo tvorí 8.3% z celkovej plochy $412.6m^2$. Takisto sa úplne eliminuje odpad (obr. 4.1 vpravo). Oproti konvenčným sieťam dochádza v tomto prípade k úspore 12.1% materiálu.



Obr. 4.1 Výstuženie zváranými sieťami (vľavo), vystuženie veľkoformátovými sieťami (vpravo). Modrou je znázornená použitá plocha sietí, červenou je znázornený odpad.

5 Ideový návrh portálového robota

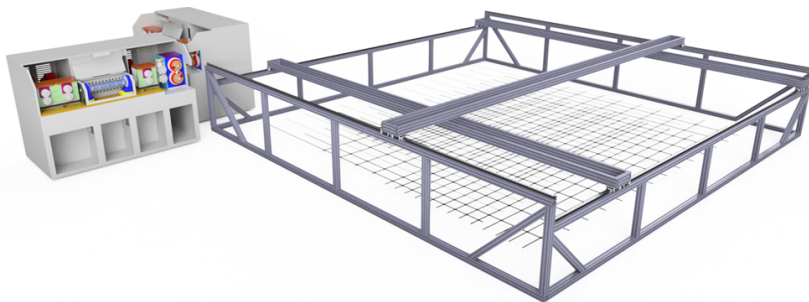
Samotný stroj bol navrhnutý výskumnou organizáciou [XEUS](#) - Civil Engineering Robotics s. r. o., kde som sa aktívne podieľal na jeho návrhu, vývoji a výrobe.

Gantry systém “Perseus” na výrobu sietí

Výstupom stroja (obr. \ref{obr_gantry}) je výstužná sieť, ktorá môže mať ľubovoľný tvar vyskladateľný z jednotlivých rovných prútov – to znamená štvorce, obdĺžniky, tvary písmen „L“, „T“ a iné. Pre tento účel bola zostrojená rámová konštrukcia výšky približne 1m\$ s troma nezávislými vedeniami. V osi „X“ je ukladateľ, ktorý vezme odstrihnutý prút z vyrovnávačky a uloží ho do riadkov. Následne sa odparkuje mimoúrovňovo, čím dá možnosť pohybu ďalším dvom nezávislým osiam – „Y1“ a „Y2“. Jedna z týchto osí, podobne ako os „X“, ukladá nastrihané prúty kolmo na prvú vrstvu, zatiaľ čo druhá os zabezpečuje viazanie naukladaných výstuží.

Konštrukcia stroja tak predstavuje gantry portál s výškou 500/800 mm\$ (jednotlivé osi). Základným stavebným prvkom je hliníkový profil, ktorý poskytuje okrem nízkej váhy aj vysokú univerzálnosť, ktorá napomáha k ľahkej montáži/demontáži zariadenia a prináša so sebou možnosť prototyp jednoducho a priamočiaro modifikovať v prípade potreby.

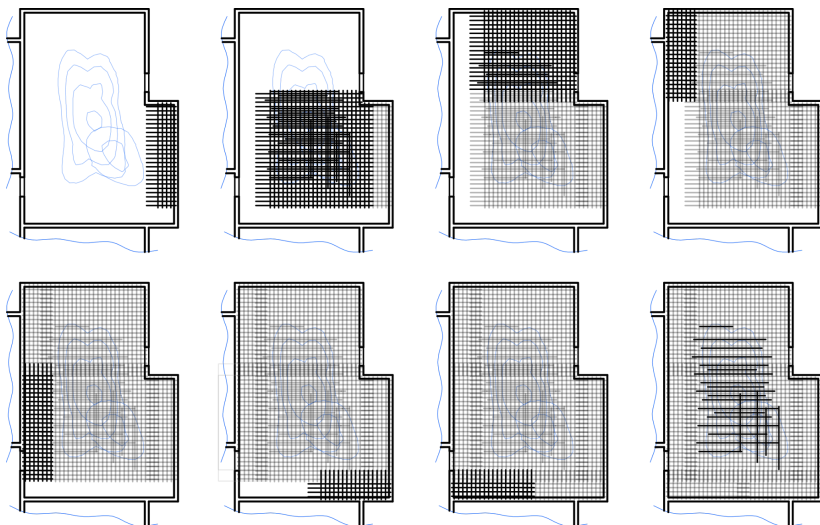
Riadenie celého systému zabezpečuje dvojica IPC (priemyselný počítač) + PLC (programovateľný logický kontrolér). IPC s vysokým výkonom je zodpovedný za generovanie tvarov a dráh pre konkrétnu sieť.



Obr. 5.1 Gantry portál Perseus firmy XEUS - Civil Engineering Robotics.

6 Veľkoformátové optimalizované siete

Ako už bolo spomenuté v závere kapitoly 4, viazanie výstuže v podobe veľkoformátových sietí pomocou robotov umožňuje navrhovať jednotlivé pruhy výstuže plošných prvkov tak, aby sa nachádzali výlučne v tých miestach, v takej vzdialenosti a v takej dĺžke ako je staticky nutné, keďže pri použití konvenčných metód vystužovania sa dbá na dostatočnú jednoduchosť vyhotovenia.



Obr. 6.1 Gantry portál Perseus firmy XEUS - Civil Engineering Robotics.

V praxi to znamená, že projekty, kde je vo výkresoch výstuže príliš veľa položiek, sú nežiadúce pre ich zdĺhavé vyhotovenie. Hľadá sa teda kompromis medzi spotrebou výstuže a rýchlosťou vyhotovenia. Pri viazaní výstuže pomocou robotov sa na ľudský faktor pri jej viazaní neberie ohľad. Na obr. 6.1 je vyobrazené chronologické usporiadanie veľkoformátových optimalizovaných sietí - VOS. Je možné vidieť, že jednotlivé pruhy dodatočnej výstuže sú navrhované len v miestach najviac exponovaných ťahovým napätiam, ktoré sú reprezentované izočiarami. Je však nutné dodržať nasledovný postup a pravidlá pri jej návrhu, aby bola zabezpečená bezproblémová inštalácia sietí na stavbe.

Návrh výstuže

Gantry systém viažuci výstuž, je navrhnutý tak, že spracúva výstuž jedného priemeru. Príločky musia teda byť vyhotovené z rovnakého priemeru ako je vyhotovený základný raster. Potrebná plocha výstuže je preto regulovaná

vzdialenosťami jednotlivých prútov výstuže. V riešenej stropnej doske je už navrhnutý základný raster z prútov 8mm vo vzdialenostiach $s_{prov} = 220\text{mm}$. V jednom bežnom metri stropnej dosky je teda dodaných 4.55 prúta výstuže alebo $2.51\text{cm}^2/\text{m}'$. Pridaním ďalšieho prúta s prierezovou plochou 0.503cm^2 do bežného metra získame výstuž, ktorá svojou plochou vykryje oblasť ohraničenú izolíniou s hodnotou toho istého priemeru získame izočiaraou $2.513\text{cm}^2 + 0.503\text{cm}^2/\text{m}'$. Hodnota pre i -tu izočiara, kde nultá izočiara reprezentuje plochu pokrytú základným rastrom, sa vypočíta na základe $A_{s,i} = \left(\frac{1m}{s_{prov}} + i \right) A_{s,\phi}$.

Návrh výstuže si vyžaduje oproti konvenčným spôsobom precíznejší a viac sofistikovaný návrh. Samotný proces návrhu je možné rozdeliť na tri etapy:

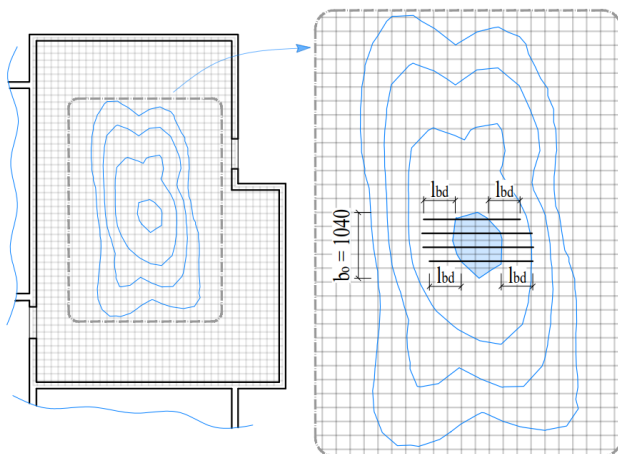
- návrh základného rastra
- rozmiestnenie príložiek
- delenie na VOS

Rozmiestnenie celoplošnej výstuže

Prvým krokom je teda prekryť riešenú vystužovanú oblasť rastrom s veľkosťou oka navrhutej vzdialenosti jednotlivých prútov. Následne túto oblasť orezať a vytvoriť tak jednu veľkú sieť. V tejto fáze návrhu môže mať väčšie rozmery ako $6 \times 6\text{m}$, pretože bude na konci procesu rozdelená na viaceré VOS.

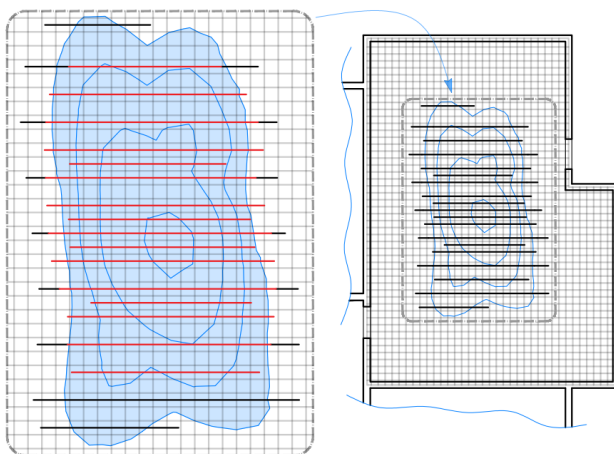
Rozmiestnenie príložiek

Prvá riešená oblasť je tá, kde je nutné do metra dodať najvyšší počet prútov príložiek. Na obrázku 6.2 je šírka IV. vystužovanej oblasti (kde je nutné dodať 4 prúty výstuže do bežného metra stropnej dosky), anotovaná kótou b_o . V tejto oblasti by mala byť výstuž rozmiestnená tak, aby úsečku dĺžky jeden meter, umiestnenú svojím stredom kdekoľvek v tejto oblasti pretínali minimálne 4 prúty výstuže. Na obrázku 6.2 táto podmienka zatiaľ nie je splnená. Tá však bude splnená pridaním výstuže v ďalších krokoch návrhu. Výstuž je najrozumnejšie umiestňovať rovnomerne medzi prúty výstuže základného rastra, táto zásada však nie je podmienkou. Výstuž je možné umiestňovať ľubovoľne, dodržiujúc konštrukčné zásady vystužovania (minimálna svetlá vzdialenosť medzi prútmi výstuže). Prúty výstuže je nutné zaviesť minimálne o hodnotu kotevnej dĺžky l_{bd} za hranice riešenej vystužovanej oblasti.



Obr. 6.2 Prvý krok v rozmiestnení príložiek pri spodnom povrchu v riešenej stropnej doske.

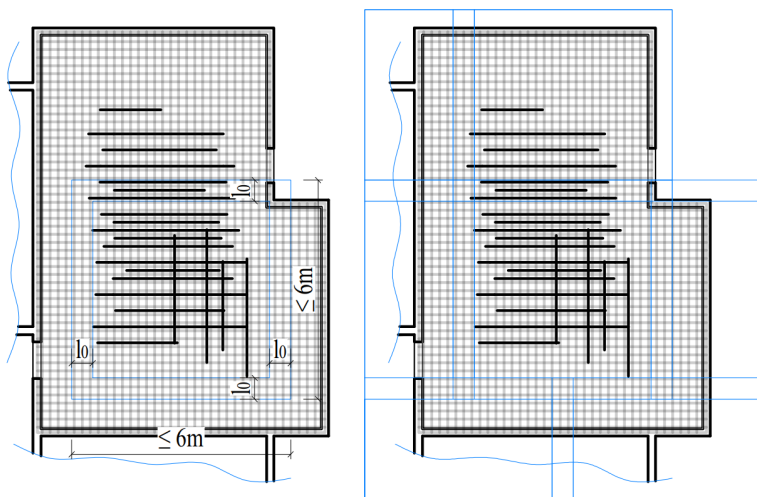
V nasledujúcich krokoch sú postupne riešené ďalšie výstužné oblasti. Za hranicu danej je vytiahnutý na dĺžku oblasti l_{bd} vždy len potrebný počet prútov. Postup sa opakuje pre všetky riešené oblasti (obr. 6.3). Tento postup je totožný pre oba smery výstuže.



Obr. 6.3 Riešenie I. výstužnej oblasti, posledný krok návrhu príložiek spodnej výstuže v smere X danej dosky

Vytvorenie veľkoformátových optimalizovaných sietí

Prvým krokom pri rozdelení výstuže navrhutej podľa predchádzajúceho odseku je umiestnenie takezvanej primárnej VOS (obr. 6.4). Túto primárnu veľkoformátovú sieť v prípade výstuže pri spodnom povrchu sústreďujeme do ťažiska vystuženia, teda tam, kde je potrebná plocha výstuže koncentrovaná. Takisto je nutné zohľadniť, ktorý smer výstuže je bližšie ku debneniu, pretože jednotlivé siete musia do seba zapadať. Rešpektujúc túto primárnu sieť sa ku nej pripoja ďalšie siete. V tomto prípade je bližšie ku spodnému povrchu výstuže v smere X. Prúty v tomto smere môžu presahovať do miesta, kde sa jednotlivé siete stykujú. Prúty v sekundárnom smere vystuženia musia byť obsiahnuté v pôdorysnej ploche VOS, v ktorej nie sú siete stykované. Je to kvôli zabezpečeniu bezproblémového zapadnutia jednotlivých VOS medzi sebou.



Obr. 6.4 Umiestnenie primárnej siete (vľavo) a návrh rastra rozloženia sietí (vpravo)

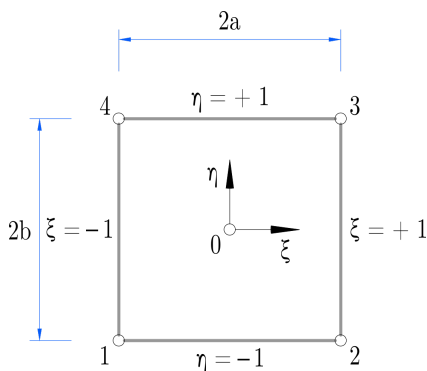
Nasleduje vytvorenie samotných VOS rešpektujúc hlavný smer vystuženia, umiestnenie prútov príložiek a chronologické usporiadanie pri ich montáži tak ako je znázornené na obrázku 6.1.

7 Využitie MKP pri návrhu veľkoformátových optimalizovaných sietí

Komerčne používané statické programy siete ponúkajú zobrazovanie potrebnej plochy výstuže v plošných železobetónových prvkoch v podobe izočiari. Nedostatkom však je, že v týchto programoch nie je možné nastavenie hodnôt, ktoré majú tieto izočiary zobrazovať. Toto riešenie slúži ako podklad pre ďalšie zložitejšie matematické modely.

Pravouhlý doskový konečný prvok MZC

Bol použitý konečno-prvkový doskový prvok MZC zobrazený na obrázku 7.1 Je pomenovaný po kolektíve autorov Melosh, Zienkiewicz a Cheung [03], [04]. Ide o tenkú dosku s pravouhlými stranami opísanú štyrmi uzlami.



Obr. 7.1 MZC štvoruzlový element

Návrh výstuže

Potrebná plocha výstuže $A_{s,req}$ [05] v ťažisku konečného prvku sa vypočíta na základe priemernej hodnoty ohybových momentov v jednotlivých uzloch. Vektor ohybových momentov v ťažisku prvku sa vypočíta ako

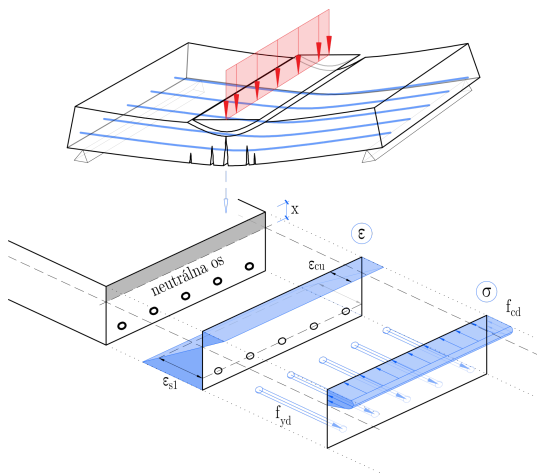
$$M^{(e)} = \begin{bmatrix} M_x & M_y & M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 \frac{DB_b}{4} e_{r_i}$$
 kde e_{r_i} je vektor výsledných deformácií konečného prvku.

Plocha výstuže

V železobetónových ohýbaných prvkoch sa výstuž navrhuje hlavne v miestach ťahových napätí. Jedným zo spôsobov návrhu výstuže v plošných prvkoch je návrh plochy výstuže v ťažisku konečného prvku. V stropných doskách sa výstuž navrhuje v oboch smeroch stropnej dosky, buď ako konštrukčná alebo ako nosná výstuž. Výstuž sa navrhuje na takzvanú návrhovú hodnotu ohybového momentu M_{Ed} .

Vypočítaná potrebná plocha výstuže v ťažisku prvku sa spravidla počíta ako potrebná prierezová plocha na bežný meter šírky stropnej dosky (cm^2 / m).

Odolnosť takéhoto prierezu je definovaná dosiahnutím pomerného pretvorenia $\varepsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰}$, betón sa rozdrví tlakom (Obr. 7.2).



Obr. 7.2 Napätosť v priereze pred porušením ohybom

Výpočet návrhových ohybových momentov M_{Ed}

Dodatok ku eurokódu (ENV 1992-1-1 EC2 Design of Concrete Structures - Appendix 2) umožňuje použiť metódu Wood & Armer. Autormi tejto metódy určenia ekvivalentných ohybových momentov sú R.H.Wood [06] a G.S.T.Armer [07].

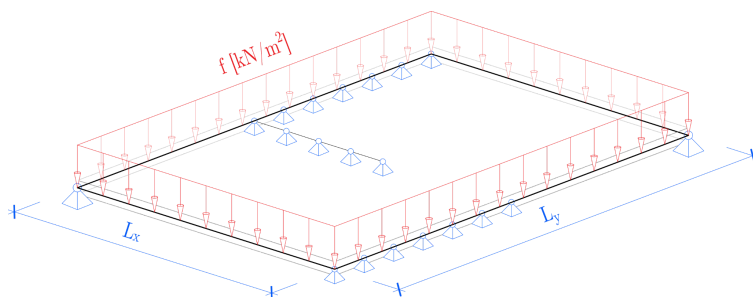
Pre vybrané smery x a y sú vypočítané dva typy návrhových ohybových momentov:

- dolné (kladné, spôsobujúce ťahové napätia hlavne v spodných vláknach)
- horné (záporné, spôsobujúce ťahové napätia hlavne v horných vláknach)

8 Program na návrh veľkoformátových optimalizovaných sietí

Komerčne dostupné programy používané v inžinierskej praxi neumožňujú jednoduchý výstup, ktorý by slúžil ako podklad pre návrh výstuže viazanej robotmi. Táto kapitola je venovaná návrhu ťažiskovej úlohe dizertačnej práce a to návrhu jednoduchého MKP programu (na základe teórie uvedenej v kapitole 6) na riešenie železobetónových dosiek, ktorého výstupom budú práve izolínie slúžiace ako podklad pre návrh veľkoformátových optimalizovaných sietí (kapitola 4), ktoré je možné vyrobiť pomocou robota.

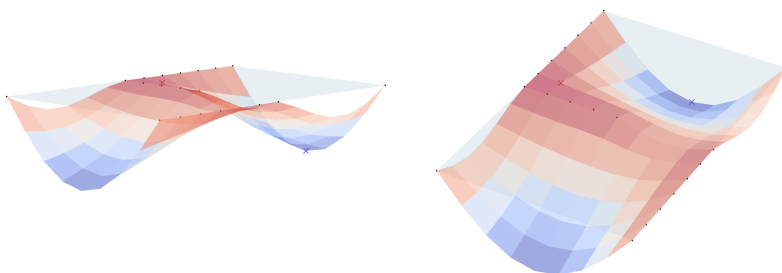
Čiastkové výsledky budú demonštrované na príklade stropnej dosky z obrázku 8.1.



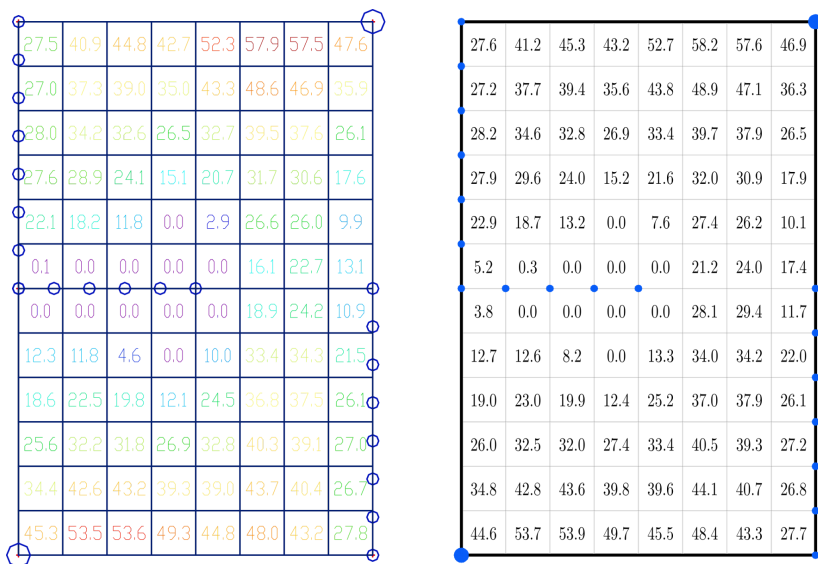
Obr. 8.1 Vzorový príklad

Porovnanie výsledkov

Pre porovnanie výsledkov, bola konštrukcia z obrázku 8.1 modelovaná v statickom programe SCIA Engineer 20. Na obrázku 8.3 sú na ľavej strane výsledky z programu SCIA a na pravej strane sú uvedené výsledky z popisovaného programu.



Obr. 8.2 Deformácie konštrukcie vzorového príkladu. (× - minimálna deformácia, × - maximálna deformácia)



Obr. 8.3 Návrhové ohybové momenty v ťažiskách konečných prvkov pre návrh výstuže pri spodnom povrchu v smere X

Podklad pre návrh veľkoformátových optimalizovaných sietí

Výstupom programu sú automaticky generované izolínie reprezentujúce jednotlivé výstužné oblasti. Ich automatickým generovaním sa odstraňuje zdĺhavý proces ich skladania. Sú tak plnohodnotným podkladom pre návrh veľkoformátových optimalizovaných sietí opísaných v kapitole 6. Na vykreslenie konštrukcie a výsledkov je použitá knižnica Matplotlib [8], ktorá je rozšírením použitej knižnice NumPy [9].

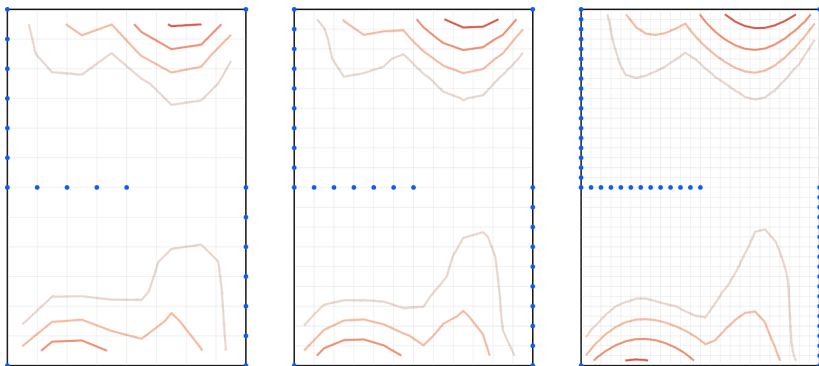
Vizualizácia výsledkov

V poslednom kroku, je nutné definovať rezové roviny, ktoré budú pretínať povrchy reprezentujúce množstvo výstuže. Tieto rezové roviny si môžeme predstaviť ako hladiny plochy výstuže definované podľa vzťahu $A_{s,I_i} = \left(\frac{1m}{s_{prov}} + i \right) A_{s,\phi}$.

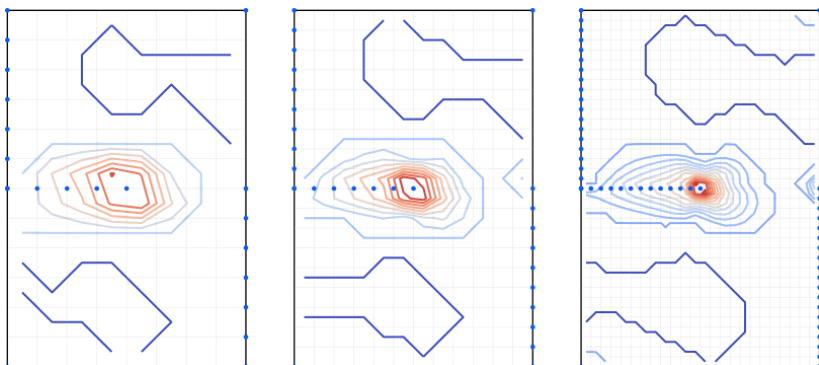
Hodnota prvej hladiny definujúcej prvú výstužnú oblasť má hodnotu rovnú plochy výstuže potrebnej na splnenie normatívnej požiadavky minimálneho stupňa vystuženia ohýbaného prvku. Postup výpočtu všetkých hladín reprezentujúcich výstužné oblasti je rovnaký pre výstuž pri oboch povrchoch a takisto aj pre oba smery.

Na zobrazenie výsledkov je použitá metóda `contour` knižnice *Matplotlib*. Argumentom `levels` tejto metódy sú nastavené hladiny, v ktorých má byť povrch reprezentujúci potrebné plochy výstuže v jednotlivých elementoch rozdelený na jednotlivé výstužné oblasti.

Na obrázkoch 8.4 a 8.5 je možné vidieť výstup programu popísaného v dizertačnej práci.



Obr. 8.4 Výstužné oblasti pre spodný povrch stropnej dosky v smere *X*. Veľkosť konečného prvku: 0.75m vľavo, 0.5m stred a 0.25m vpravo.



Obr. 8.5 Výstužné oblasti pre horný povrch stropnej dosky v smere *Y*. Veľkosť konečného prvku: 0.75m vľavo, 0.5m stred a 0.25m vpravo.

9 Záver

Dizertačná práca je venovaná problematike automatizácie v stavebnom priemysle, konkrétne optimalizácii roboticky viazanej výstuže. V úvode je stručne popísaná aktuálnosť problému spolu so stručným obsahom dizertačnej práce. V kapitole 1 je zhrnutý **historický vývoj**, ktorý nadväzuje na **súčasný stav problematiky**. **Ciele práce a metodika** sú uvedené v kapitole 2.

Kapitola 3, s názvom **Koncept automatizácie vystužovania**, je venovaná porovnaniu zaužívaných spôsobov vystužovania plošných železobetónových konštrukčných prvkov spolu s prípadovou štúdiou, kde je porovnávaná spotreba výstuže. Na záver tejto kapitoly je navrhnutý koncept presunutia výroby sietí na stavenisko, čím je umožnené zväčšiť ich pôdorysný rozmer a redukovat' tak nadbytočné množstvo výstuže, ktoré je potrebné na splnenie konštrukčných zásad návrhu železobetónových prvkov. Spôsob ich výroby takisto úplne eliminuje odpad spôsobený rezaním typizovaných sietí. Takýto spôsob vystužovania prináša až 12% úsporu materiálu oproti zaužívanému spôsobu vystužovania zváranými sieťami s príložkami.

Kapitola 4, s názvom **Ideový návrh portálového robota**, je venovaná ideovému návrhu portálového robota, ktorý veľkoformátové siete dokáže autonómne vyviazať priamo na stavbe zo zvitkov ocele. Robot samotný bol navrhnutý a zostrojený spoločnosťou *XEUS - Civil Engineering Robotics s. r. o.*, kde som sa takisto aktívne podieľal na jeho návrhu.

Kapitola 5, s názvom **Veľkoformátové optimalizované siete**, je venovaná optimalizácii výstuže vo forme príložiek vo veľkoformátových sieťach. Optimalizáciou návrhu výstuže sa v porovnaní so zaužívanými spôsobmi vystužovania, sa znížila spotreba výstuže oproti výstuži vo viazanej forme o 7%. Oproti výstuži vo forme zváraných sietí s príložkami ide o 19% zníženie spotreby materiálu. V tejto kapitole je popísaná metodológia návrhu veľkoformátových optimalizovaných sietí pomocou komerčne dostupných programov.

V kapitole 6, s názvom **Využitie MKP pri návrhu VOS**, je popísaná teória použitá ako teoretický základ pre program opísaný v kapitole 7 s názvom **Program na návrh VOS**. Táto kapitola spolu s kapitolou 6 sú nosnou časťou dizertačnej práce. V tejto kapitole je popísaný program, ktorého výstupom sú izolínie, ktoré slúžia ako podklad pre návrh VOS. Výsledky vnútorných síl boli kontrolované s komerčne dostupnými programmi. Zdrojový kód programu je uvedený na linku [9], ktorý odkazuje na repozitár tejto práce.

V práci boli splnené všetky stanovené ciele. Metodika návrhu veľkoformátových optimalizovaných sietí zabezpečí výrazné zníženie spotreby betonárskej výstuže v plošných železobetónových konštrukčných prvkoch. Samotnú automatizáciu viazania betonárskej výstuže pomocou portálového robota *Perseus*, ktorý bol vyvinutý aj na základe tejto práce. Už v čase písania práce o automatizáciu viazania

betonárskej výstuže prejavili záujem najväčšie developerské firmy pôsobiace na území Slovenskej republiky.

Program uvedený v tejto práci, ktorého výstupom sú podklady pre návrh veľkoformátových optimalizovaných sietí, môže slúžiť ako návod pre implementáciu do komerčne dostupných statických programov. Takáto implementácia môže výrazne zrýchliť adaptáciu veľkoformátových optimalizovaných sietí na trhu, čo by viedlo k výraznej úspore spotreby betonárskej ocele. Automatizáciou viazania betonárskej výstuže, sa znižuje potreba ľudskej pracovnej sily pri repetitívnych, neoborných častiach v procese jej vyhotovenia. Tým sa urýchli výstavba a pracovníci môžu byť využití pri komplexnejších úlohách, ktoré roboty nezvládnu. Takisto sa vysokokvalifikovaní pracovníci, na pozíciách ako je napríklad statik-inžinier, môžu viac venovať optimalizácii návrhu výstuže, keďže už viac nebudú musieť brať do úvahy ľudský faktor pri jej viazaní.

10 Použitá literatúra

- [1] UN Environment programme *Building sector emissions hit record high, but low-carbon pandemic recovery can help transform sector* UN report~2020
- [2] Eurostat *Accidents at work statistics* Statistics explained~2020.
- [3] Zienkiewicz, O.C., Cheung, Y.K. *The finite element method for analysis of elastic isotropic and isotropic slabs*. Proc. Inst. Civ. Engng~1964.
- [4] Melosh, R.J. *Structural analysis of solids*. ASCE~1963.
- [5] Benko V., Bilčík J., Fillo L., Halvonik J. *Betónové konštrukcie* STU Bratislava~2008.
- [6] Wood, R.H *The Reinforcement of Slabs in Accordance with a Pre-Determined Field of Moments* Concrete, 2~1968.
- [7] Armer, G.S.T. *correspondence* Concrete, 2~1968.
- [8] <https://matplotlib.org>
- [9] <https://numpy.org>
- [10] https://github.com/Medvedku/Dizertacna_praca

11 Zoznam publikovaných prác autora

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

RUBINT, J. – JENDŽELOVSKÝ, N. Influence of reinforcement rebars modeling in concrete structural elements on transient-thermal calculations. In *SGEM 2021. 21th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Volume 21. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Sofia: STEF 92 Technology, 2021, p. 233–240. ISBN 978-619-7603-20-0

RUBINT, J. – RUBINT, S. Automatic Crack Width Determination in Concrete Structures. In *SGEM 2019. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Volume 19. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Sofia: STEF 92 Technology, 2019, p. 79–85. ISBN 978-619-7408-77-5

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách.

RUBINT, J. Časovo závislá analýza dodatočne predpätej konštrukcie mosta pri Svrčinovci. In *JENDŽELOVSKÝ, N. – GRMANOVÁ, A. New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*. Bratislava: Spektrum STU, 2018, ISBN 978-80-2274845-2.

RUBINT, J. Effects of meshing density of 1D structural members with nonuniform cross-section along the length on the calculation of eigenfrequencies. In *MELCER, J. – KOTRASOVÁ, K. – MAJOR, I. – BENIN, A V. Dynamics of CivilEngineering and Transport Structures and Wind Engineering - DYN-WIND'2020*. Londýn: EDP Sciences, 2020.

RUBINT, J. Optimalizácia siete modálnej analýzy metódy konečných prvkov pomocou genetických algoritmov. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 64–69. ISBN 978-80227-5052-3.

RUBINT, J. Využitie optických zariadení pri meraní šírky trhlín v konštrukciách zatvázaných dynamickým zaťažením. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2019, s. 42–47. ISBN 978-80-227-4972-5.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

PAULÍK, P. – RUBINT, J. – ŠEVČÍK, P. – HAVLÍČEK, P. Poznatky z diagnostiky porúch predpätých mostov z 80-tych rokov v Bratislave. *Buildustry*, 36. s. 36–38.