

HODNOCENÍ POUŽITÍ RECYKLOVANÉHO BETONU JAKO BĚŽNÉHO STAVEBNÍHO MATERIÁLU

ASSESSMENT OF USING RECYCLED CONCRETE AS ORDINARY BUILDING MATERIAL

NATALIYA POKORNÁ,
PETR ŠTEMBERK,
ALENA KOHOUTKOVÁ

Článek popisuje metodu hodnocení použití recyklovaného betonu pro konstrukční prvky pozemních staveb z hlediska statického, ekonomického a ekologického. Metoda je předvedena na příkladech kvantitativního určení vhodnosti možných konstrukčních řešení.

The paper describes a method of assessment of using recycled concrete for various structural members with respect to statics, economy and ecology. The method is demonstrated in examples of quantitative assessment of applicability of possible structural designs.

Správným trendem ve stavebnictví je alespoň částečné nahrazení základních přírodních materiálů materiály recyklovanými. Tento přístup je nejen šetrný k životnímu prostředí, ale je též ve shodě s efektivním využitím přírodních zdrojů. V České republice je tato problematika rozpracována v dokumentu „Surovinová politika v oblasti nerostných surovin a jejich zdrojů“ schváleném vládou České republiky 13. prosince 1999.

V případě recyklace stavebního odpadu, se jedná hlavně o šetření přírodních zdrojů a snížení počtu skládek stavebního odpadu. Největší využití recyklovaných stávk se očekává v lokalitách s nedostatkem přírodních zdrojů, protože přírodní stavební hmoty, jako například stavební kameny, mají malou přidanou hodnotu, a tudíž jejich cena je přímo ovlivněna náklady na dopravu. Na druhou stranu, projektanti se obávají snížených mechanických vlastností recyklovaných stávk, což brání jejich širšímu využití.

Tento článek se zabývá vyhodnocením železobetonových konstrukčních prvků a konstrukcí, které jsou zhotoveny z betonu s recyklovaným kamenivem. Metoda vyhodnocení je krátce popsána a její použitelnost je předvedena na ilustrativních příkladech. Fuzzy logika je podstatou vyhodnocovací metody, proto je stručně představena stejně jako

fuzzy výpočet, který je použit v analýze konstrukcí.

Hlavním cílem tohoto článku je napomoci rozšíření používání betonu s recyklovaným kamenivem. Kvantitativní informace o provedení konstrukce z recyklovaného betonu, a zejména o její ceně, mohou pomoci přesvědčit projektanty o využívání recyklovaných materiálů také pro vícepodlažní objekty.

FUZZY MNOŽINY

Nejistota přítomná ve vstupních parametrech může být popsána pomocí teorie fuzzy množin [1], kde neurčité hodnoty jsou definovány jako fuzzy množiny. Na rozdíl od klasické teorie množin, příslušnost prvku k fuzzy množině zahrnuje též hodnoty mezi 0 a 1, kde 0 znamená „nenáležet“ a 1 znamená „rozhodně náležet“ k dané fuzzy množině. Obvykle je fuzzy množina představována slovním označením. Pokud je fuzzy množina představována číslovkou, nazývá se fuzzy číslem. Pojem fuzzy číslo vznikl ze zkušenosti každodenního života, kdy mnoho jevů, které mohou být kvantitativně určeny, nejsou zcela charakterizovány přesnými čísly.

Příklad fuzzy čísla je uveden na obr. 1, kde μ představuje funkci příslušnosti a a_1 a a_2 znázorňují interval reálných čísel (α -řez) odpovídající dané hodnotě funkce příslušnosti, například $\alpha = 0,5$. Fuzzy číslo může být vyjádřeno nominální hodnotou a funkcí příslušnosti na každé straně nominální hodnoty, nebo množinou α -řezů. V případě, kdy fuzzy čísla jsou definována množinou α -řezů, úloha fuzzy výpočtů se redukuje na známé početní operace na intervalech, které se

aplikují na každém α -řezu. Více lze nalézt například v [2].

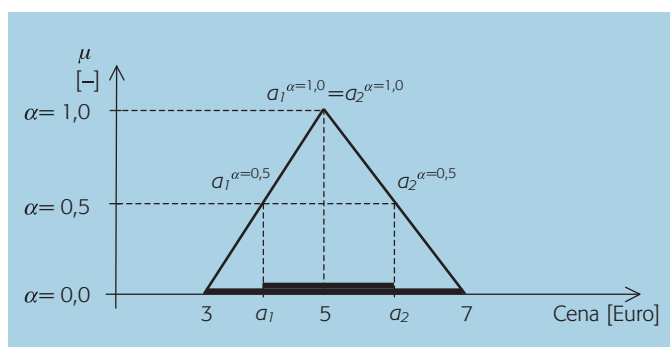
Na rozdíl od klasické logiky, která uvažuje pouze dva stavy: pravdu a nepravdu, fuzzy logika je schopna uvažovat také stavy přechodné mezi těmito stavy absolutní pravdy a absolutní nepravdy. Na toto může být pohlíženo jako na matematický nástroj, který umí pracovat s nepřesným popisem, jako např. „trochu dražší“. Další podrobnosti lze nalézt např. v [3].

STRUČNÝ POPIS METODY VYHODNOCENÍ

Protože všechny předběžné odhady při navrhování obsahují neurčitosti ve vstupních údajích, měla by se neurčitost uvažovat po celou dobu výpočtu tak, aby projektant mohl vyhodnotit její vliv a podle toho se rozhodovat. Zde metoda návrhu používá teorii fuzzy množin a veškeré kvantitativní údaje, které obsahují neurčitost, jsou vyjádřeny pomocí fuzzy čísel. Na obr. 1. je příklad ceny recyklovaného kameniva do betonu.

Takto vyjádřené informace o materiálových vlastnostech, složení betonové směsi a cenách jsou použity při návrhu, při kterém se postupovalo podle Eurokódu 2. Každý konstrukční prvek je navržen a posouzen na mezní stav únosnosti a použitelnosti, zatímco systém určuje optimální rozměry průřezu odpovídající minimální ceně. V této fázi systém nabízí všechna blízká řešení, jejichž cenový rozptyl zasahuje do rozptylu řešení s minimální cenou. Na základě těchto informací se projektant může dále rozhodovat s ohledem na své priority, jako například minimalizovat množství cementu, pokud

Obr. 1
Příklad odhadu ceny (v eurech) pomocí fuzzy čísla
Fig. 1
Example of price estimation (in Euro) with fuzzy number



Vlastnosti a ceny	Podíl recyklovaného kameniva [%]				
	0	30	50	70	100
Pevnost v tlaku [MPa]	18	16,8	15,2	14,5	13,5
Modul pružnosti [GPa]	26,2	24,9	23,6	22,3	21,0
Měrná hmotnost [kg/m ³]	2358	2326	2303	2274	2245
Součinitel dotvarování [-]	2,5	3,0	3,3	3,6	4,0
Nejnižší cena [Euro]	61,5	55,6	51,5	47,4	40,4
Nejvyšší cena [Euro]	70,7	64,7	60,2	54,6	47,6

Tab. 1 Vstupní parametry pro analýzu
Tab. 1 Input parameters for analyses

chce projektant zahrnout další environmentální aspekty. Výsledky pro každý konstrukční prvek jsou pak dále kombinovány a je určena celková cena konstrukce. Systém je navržen tak, že může pracovat pouze s jedním druhem betonu pro celou konstrukci, což je reálný přístup.

Rozhodování použité při optimalizaci konstrukce je založeno na pravidlech fuzzy logiky IF-THEN. To znamená, že v algoritmu jsou použity fuzzy množiny, které vyjadřují blízkost řešení k mezním hodnotám, jako je maximální povolený průhyb, a na základě odpovídajících hodnot funkcí příslušnosti jsou přijímána odpovídající rozhodnutí.

PŘÍKLADY POUŽITÍ

Vstupní parametry uvažované v příkladech jsou uvedeny v tab. 1, která obsahuje údaje o betonu vyrobeném z recyklovaného kameniva [4]. Betonové směsi byly připraveny se stejným vodním součinitelem a téměř shodným množstvím cementu. Množství recyklovaného kameniva z celkově použitého množství je uvedeno v procentech v horním řádku tabulky. Pevnost v tlaku a měrná hmotnost byly taktéž převzaty z [4]. Modul pružnosti byl určen podle vztahu z Eurokódu 2 a jeho změna v závislosti na procentu recyklovaného kameniva byla získána z [5]. Součinitel dotvarování byl odhadnut na základě zkušeností s recyklovaným betonem. Nejnižší a nejvyšší ceny betonu s použitím přírodního kameniva (0 %) byly převzaty ze současných ceníků několika českých výrobců betonu. Pro jiné poměry byla cena vypočtena s ohledem na ceny přírodního kamene a kameniva z recyklovaného betonu.

Z porovnání hodnot uvedených v tab. 1 je patrné, že pokud projektant zvolí beton vyrobený pouze z recyklovaného kameniva, cena recyklovaného betonu je podstatně nižší než cena běžného betonu vyrobeného z přírodního kameniva. Průměr-

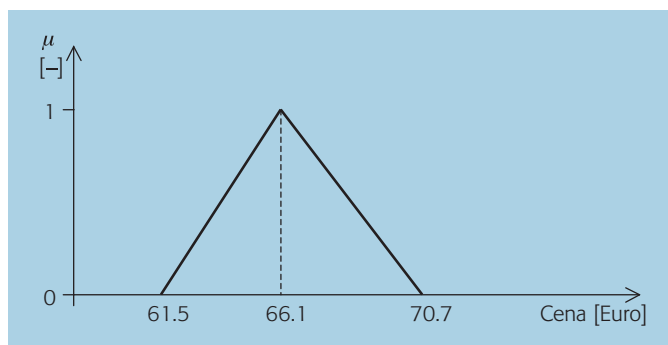
ná cena je přibližně 66 % ceny betonu z přírodního kameniva, zatímco pevnost v tlaku je nižší pouze o 25 %. To znamená, že již dnes je výkonnostní poměr (cena k vlastnostem) vyšší u betonů vyrobených z recyklovaného betonového kameniva. Nicméně projektanti nyní nejsou ochotni používat recyklované stavební materiály z nejrůznějších důvodů, především z důvodu těžko předvídatelné funkčnosti konstrukce z dlouhodobého hlediska. Přinejmenším musí projektant vzít v úvahu rostoucí součinitel dotvarování, který předznamenává problémy se splněním kritérií mezního stavu použitelnosti.

Vliv poměru recyklovaného kameniva, které nahrazuje přírodní kamenivo, je určen za použití běžných návrhových postupů pro železobetonové konstrukce podle Eurokódu 2. Je však třeba přijmout předpoklad, že hodnoty 28denní pevnosti betonu v tlaku uvedené v tab. 1 jsou charakteristické hodnoty. Tento předpoklad je pro naše účely přijatelný.

Tab. 2 Šest nejlepších řešení pro nosník
Tab. 2. First six solutions for girder

Pořadí	Cena nosníku [Euro]			Podíl recyklovaného kameniva	Výška x šířka [mm]	Množství cementu [kg]
	Průměr	Minimum	Maximum			
1	46,8	44,0	49,5	30%	550 x 200	214
2	48,9	46,2	51,6	70%	550 x 250	259
3	50,3	47,0	53,5	100%	550 x 300	293
4	50,3	47,6	53,1	0%	550 x 200	221
5	51,7	48,6	54,9	30%	500 x 250	243
6	49,3	52,6	55,9	50%	550 x 250	262

Obr. 2 Příklad určení ceny betonu (v eurech)
Fig. 2 Example of estimation of price of concrete (in Euro)

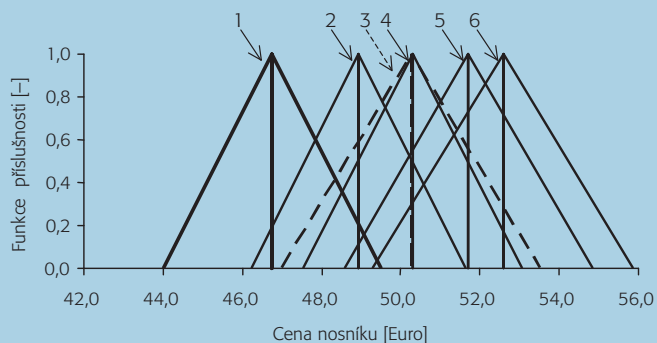


Automatizovaný výběr optimálního složení směsi pro zajištění nejnižší ceny konstrukčních prvků

V této analýze je použit automatizovaný algoritmus pro výběr optimálního složení betonové směsi pro získání nejnižší ceny jednotlivých konstrukčních prvků soustavy: nosník, deska a sloup. Je uvažováno pět různých betonových směsí podle množství recyklovaného kameniva (v procentech z celkově použitého kameniva), které jsou uvedeny v tab. 1. Ceny betonových směsí, které se různí podle výrobců, jsou vyjádřeny pomocí fuzzy čísel, kde minimální a maximální ceny z tab. 1 jsou použity jako hranice α -řezu pro $\alpha = 0$ a jejich průměr je cena pro $\alpha = 1$. Příklad takového použití je uveden na obr. 2. V celé analýze je uvažována standardní ocel B500C s přesnou cenou 0,80 Euro za 1 kg.

V analýze byl uvažován nosník o rozpětí 5,5 m s průřezem 550 mm vysokým zatížený užitným zatížením 12 kN/m. Rozměry bednění je možno modulově měnit po 5 mm ve třech směrech. Tab. 2 shrnuje prvních šest nejlepších řešení, jejichž cenové rozsahy zahrnují minimální ceny. Beton se 30 % recyklovaného kameniva vykazuje nejnižší cenu a nejmenší množství cementu, nicméně toto řešení ubírá 50 mm světlé výšky podlaží. Výsledky jsou uvedeny na obr. 3.

Tab. 3 obsahuje výsledky analýzy nosníkové desky o rozponu 2,5 m a výpočet je vztažen na šířku 1 m. Bylo uvažováno zatížení 2 kN/m². V případě desky nejméně nákladné řešení představuje beton se



Obr. 3
Šest nejlepších řešení pro nosník
Fig. 3
First six solutions for girder

100 % recyklovaného kameniva. Pouze tři první řešení se překrývají. Průměrná cena betonové desky vyrobené z přírodního kameniva byla o 2,77 Eura vyšší než nejvýhodnější cena. Výsledek je zobrazen na obr. 4.

V analýze sloupů byl použit pouze mezní stav únosnosti. Sloup o výšce 4 m byl zatížen silou 2 MN. V tomto případě bylo nejméně nákladným řešením použí-

tí betonu s výhradně přírodním kamenivem, nicméně cena pro beton se 70 % recyklovaného kameniva se příliš neliší. Čtyři nejlepší výsledky jsou uvedeny v tab. 4 a na obr. 5.

Automatizovaný výběr optimálního složení směsi pro zajištění nejnižší ceny celé konstrukce

V této analýze se uvažuje soustava z typic-

kých konstrukčních prvků v jednom podlaží. Protože je v celé konstrukci použit jeden druh betonu, je minimalizována celková cena konstrukce. To znamená, že o složení směsi rozhodují konstrukční prvky s největším objemem. Typicky se jedná o desku. Konstrukce je ukázána i se všemi nezbytnými rozměry na obr. 6. Uvažované zatížení působící na desku je 3 kN/m². Aby se simuloval vliv vyšších podlaží, bylo uvažováno zatížení působící na sloup 2 MN.

Celkové výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 7. Nejméně finančně náročné řešení je samozřejmě pro beton se 100 % recyklovaného kameniva. Z tab. 6 je zřejmé, že o ceně rozhodují deska a trámy. Druhé nejvýhodnější řešení je pro beton s výhradně přírodním kamenivem. Pokud by byla jediným kritériem cena, zvítězila by varianta se 100 % recyklovaným kamenivem. Pokud by však bylo uvažováno také množství použitého cementu, byla by preferována varianta s výhradně přírodním kamenivem. Také by mělo být zvaženo snížení světlé výšky podlaží o 10 cm. V případě vodorovných prvků byl rozhodující mezní stav použitelnosti, a to zejména mezní průhyb. Tab. 6 shrnuje normalizované ceny a množství cementu pro každý konstrukční prvek, kdy cena byla normalizována ve vztahu k ceně betonu s výhradně přírodním kamenivem.

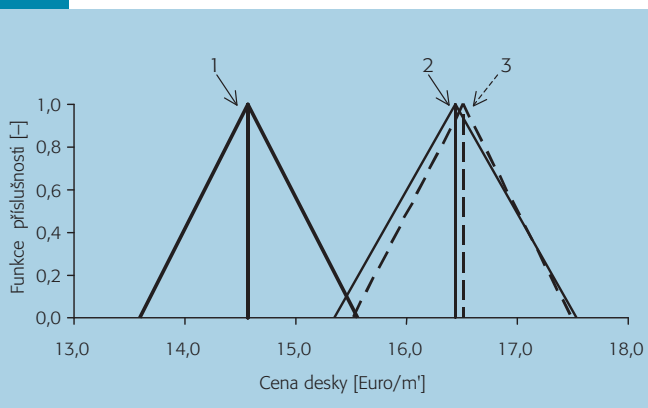
Z tab. 5 také podle očekávání vyplývá, že s výjimkou druhého nejlepšího řešení pro beton s přírodním kamenivem, kdy nejlepší materiálové vlastnosti betonu, zejména modul pružnosti a součini-

Tab. 3
Tři nejlepší řešení pro desku
Fig. 3
First three solutions for slab

Pořadí	Cena desky [Euro]			Podíl recyklovaného kameniva	Tloušťka desky [mm]	Množství cementu [kg]
	Průměr	Minimum	Maximum			
1	14,6	13,6	15,6	100%	110	89
2	16,4	15,4	17,5	50%	100	87
3	16,5	15,5	17,5	70%	110	94

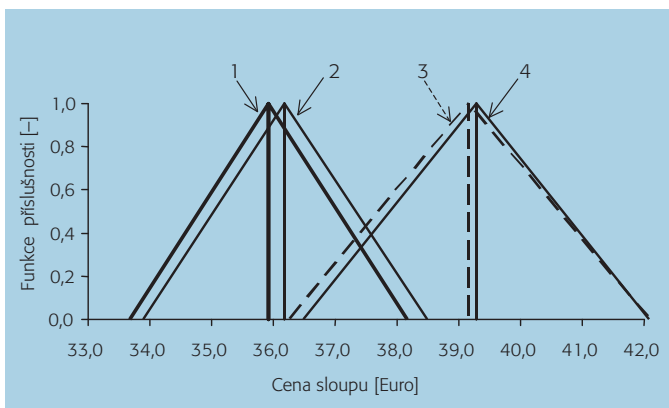
Tab. 4
Čtyři nejlepší řešení pro sloup
Tab. 4
First four solutions for column

Pořadí	Cena sloupu [Euro]			Podíl recyklovaného kameniva	Rozměry [mm]	Množství cementu [kg]
	Průměr	Minimum	Maximum			
1	35,9	33,7	38,2	0%	350 x 350	179
2	36,2	33,9	38,5	70%	400 x 400	220
3	39,2	36,3	42,1	100%	450 x 450	262
4	39,3	36,5	42,1	50%	400 x 400	221



Obr. 4
Tři nejlepší řešení pro desku
Fig. 4
First three solutions for slab

Obr. 5
Čtyři nejlepší řešení pro sloup
Fig. 5
First four solutions for column



Tab. 5 Pět nejlepších výsledků pro typické podlaží řešené konstrukce

Tab. 5 First five solutions for structure

tel dotvarování dovolují zmenšit velikosti průřezu a tak snížit cenu, vyšší poměr levnějšího recyklovaného kameniva způsobí nižší cenu konstrukce.

ZÁVĚR

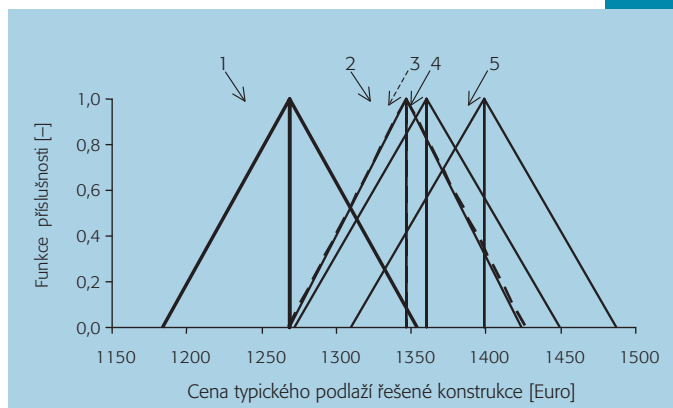
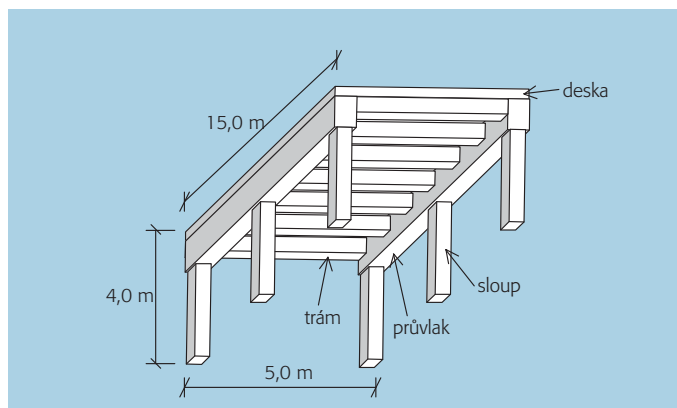
V tomto článku byla prezentována metoda hodnocení konstrukce vyrobené z recyklovaného kameniva. Aby bylo možno vzít v úvahu odlišnosti v cenách materiálů, které mohou ovlivnit výslednou cenu konstrukce, byla použita jednoduše srozumitelná fuzzy čísla. Výsledek prezentované analýzy odhalil, že neohledně na snížení materiálových charakteristik betonu s recyklovaným kamenivem, zvláště časově závislých vlastností, které vyžadují použití masivních průřezů, levnější betony s recyklovaným kamenivem jsou již dnes plně konkurenceschopné. Také možný nárůst poplatků na skládkách (již dnes se běžně platí recyklační poplatek při koupi elektrospotřebičů) a různých dotací může učinit recyklované kamenivo ještě mnohem zajímavější. Skutečností však zůstává všeobecná neochota projektantů používat recyklované kamenivo, která může být odstraněna jednoduchými metodami poskytujícími kvantitativní informaci o navržených konstrukcích a jejich ekonomické výhodnosti, jak bylo uvedeno na příkladech v tomto článku.

Obr. 6 Typické podlaží řešené konstrukce

Fig. 6 Analyzed floor structure

Obr. 7 Pět nejlepších výsledků pro typické podlaží řešené konstrukce

Fig. 7 First five solutions for structure



Poř.	Podíl recykl. kameniva [%]	Cena konstrukce [Euro]			Výška desky [mm]	Průřez trámy [mm]	Průřez průvlaku [mm]	Průřez sloupu [mm]	Světlá výška podlaží [m]	Množ. cementu [kg]
		Prům.	Mln.	Max.						
1	100	1269	1184	1354	120	500 x 250	700 x 400	450 x 450	3,30	8328
2	0	1346	1269	1424	100	150 x 200	600 x 300	350 x 350	3,40	6789
3	70	1347	1268	1426	120	500 x 250	700 x 350	400 x 400	3,30	8195
4	50	1361	1272	1449	110	150 x 250	650 x 350	400 x 400	3,35	7691
5	30	1399	1310	1487	110	450 x 250	650 x 300	400 x 400	3,35	7524

		Podíl recyklovaného kameniva [%]				
		0	30	50	70	100
Normalizovaná cena [%]	Deska	100	100	94	94	83
	Trámy	100	110	104	107	97
	Průvlaky	100	100	107	107	105
	Sloupy	100	115	108	98	106
Normalizované množství cementu [%]	Deska	100	106	104	112	106
	Trámy	100	121	118	130	123
	Průvlaky	100	105	119	128	137
	Sloupy	100	124	122	119	142

Tab. 6 Ceny a množství cementu pro každý konstrukční prvek řešené konstrukce

Tab. 6 Prices and amounts of cement for each structural member of analysed structure

Tato práce byla finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, projekt MSM6840770003, kterému tímto děkujeme.

Ing. Nataliya Pokorná

tel.: 224 354 624

e-mail: nataliya.pokorna@fsv.cvut.cz

Doc. Ing. Petr Štemberk, Ph.D.

tel.: 224 354 364

e-mail: stemberk@fsv.cvut.cz

Doc. Ing. Alena Kohoutková, CSc.

tel.: 224 353 740

e-mail: akohout@fsv.cvut.cz

všichni:

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Fakulta stavební, ČVUT v Praze

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Literatura:

- [1] Zadeh L. A.: Fuzzy sets, Information and Control, 3/1965, str. 338–353
- [2] Kaufman A., Gupta M. M.: Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and application, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York, 1985
- [3] Ross T. J.: Fuzzy logic with engineering applications, McGraw-Hill, New York, 1995
- [4] Topcu, B.: Properties of concretes with waste concrete aggregate, Cement and Concrete Research, 34/2004, str. 1307–1312
- [5] Khatib J. M.: Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, Cement and Concrete Research, 35/2005, str. 763–769