

VÍCEKRITERIÁLNÍ OPTIMALIZACE BETONOVÉ LÁVKY S VYUŽITÍM VIZUÁLNÍHO PROGRAMOVÁNÍ

Stanislav Zažirej, *

Department of Concrete and Masonry Structures, Faculty of Civil Engineering,
Czech Technical University in Prague, Thakurova 7/2077, 166 29 Prague 6, Czech Republic.
stanislav.zazirej@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek se zabývá sestavením programu pro vícekriteriální optimalizaci tvaru betonové lávky. Úloha byla definována v prostředí zásuvného modulu Grasshopper 3D programu Rhinoceros. Jedná se o jazyk a prostředí pro vizuální programování. Pomocí jednotlivých komponent byl zadán tvar konstrukce, zatížení, podpory a byl proveden statický výpočet. K nalezení optimálního tvaru konstrukce byl použit genetický algoritmus s nedominovaným řazením (NSGA-II). Výsledky optimalizace byly zpracovány pomocí shlukové analýzy k-průměrů. Získaný tvar byl použit pro vytvoření 3D modelu bednění a přípravu podkladů pro výrobu na CNC stroji.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vizuální Programování • Rhinoceros • Grasshopper 3D • Karamba3D • Wallacei X • Optimalizace • NSGA-II • Shluková Analýza

ABSTRACT

This paper deals with the compilation of a program for multi-objective optimization of the concrete footbridge shape. The whole task was defined in Grasshopper 3D plugin that runs within Rhinoceros program. It is a visual programming language and an environment. Using individual components the shape, loads and supports were defined and a structural analysis was performed. A non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was used to find the optimum shape. The results were processed using k-means clustering algorithm. The obtained shape was used to create a 3D model of a formwork and for preparation of materials for CNC machining.

KEYWORDS

Visual Programming • Rhinoceros • Grasshopper 3D • Karamba3D • Wallacei X • Optimization • NSGA-II • Cluster Analysis

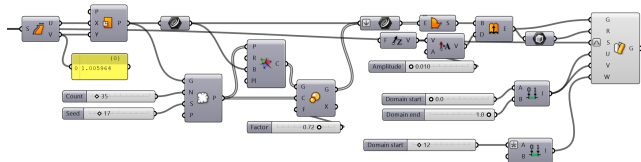
1. ÚVOD

Jedním z nástrojů digitalizace stavebnictví a nástupcem tradičních metod projektování je vizuální programování. Jedná se o způsob tvorby programů, kde příkazy nejsou zadávány textově, ale jsou znázorněny graficky (např. v podobě bloků) a jsou vzájemně propojené. Výhodou je, že uživatel nemusí znát syntaxi daného programovacího jazyka a stačí pouze přehledně popsat jednotlivých bloků. Snižují se tím překážky při učení a umožňuje to i neprogramátorům (jako jsou stavební inženýři a architekti) využít tento nástroj při své činnosti.

Tento článek se věnuje vytvoření programu s využitím vizuálního programování, pomocí kterého lze parametricky definovat tvar betonové lávky pro pěší a následně ho optimalizovat pomocí genetického algoritmu.

2. DEFINICE ÚLOHY

Úloha byla definována pomocí zásuvného modulu Grasshopper 3D (GH) programu Rhinoceros. Jedná se o jazyk a prostředí pro vizuální programování, kde lze parametricky zadat požadovaný tvar konstrukce pomocí jednotlivých komponent z nabídky. Tyto komponenty můžeme rozdělit do dvou skupin. První provádí jisté úkony (např. vytvoření křivky, rozdělení plochy, posun nebo kopie geometrie apod.), druhá skupina obsahuje data (numerickou nebo geometrickou informaci). Komponenty disponují vstupy a výstupy a lze je vzájemně propojit (viz Obr. 1).



Obrázek 1: Ukázka propojení komponent v prostředí GH.

Konstrukce se skládá ze dvou prvků - spodní nosné desky a mostovky. Tvar spodní desky je řízený třemi podélnými NURBS křivkami¹ třetího stupně. Každá křivka má tři řídicí body, u kterých je možné parametricky měnit polohu. Mostovka, která slouží pro přenos zatížení, kopíruje horní obrys nosné desky a má s ní společně některé řídicí body.

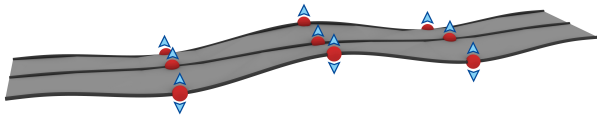
¹NURBS křivka je učena řídicími body, váhami těchto řídicích bodů, stupněm a vektorem parametrizace

* Školitel: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.



Obrázek 2: Vizualizace lávky.

Spodní desku je možné vylehčit např. pomocí otvorů, jejichž velikost a polohu lze získat vygenerováním tzv. Voroného diagramu² (viz Obr. 2). Parametry otvorů mohou být předmětem další optimalizace. V tomto článku je však uvažováno s plnými deskami konstantní tloušťky o šířce 0,3m a rozpětí 1,8m.

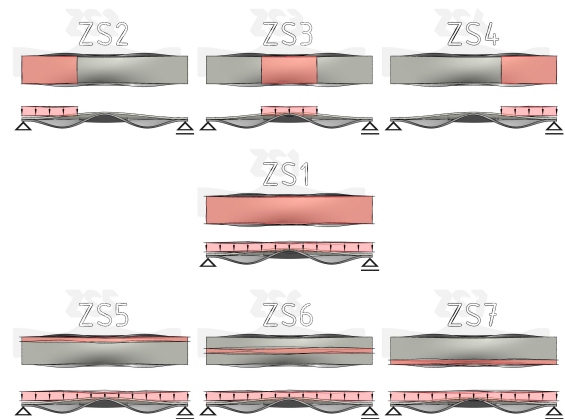


Obrázek 3: Definice tvaru spodní desky pomocí řídicích křivek a bodů.

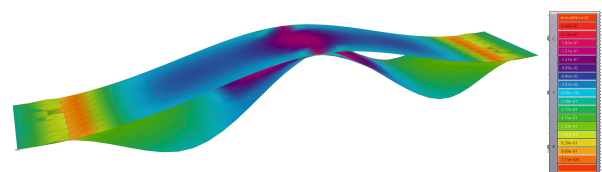
2.1. Výpočet pomocí MKP

Pro statický výpočet konstrukce byl použit GH doplněk Karamba3D, který umožňuje provádět MKP analýzu prostorových příhradových vazníků, rámu a skořepin. Kromě standardních nástrojů obsahuje algoritmy pro optimalizaci průřezu a topologie prvků, ploch výztuže nebo se dá využít k simulaci boulení čerstvé směsi při 3D tisku. Výpočetní jádro Karamby podporuje využití více vláken procesoru a dokáže provést velké množství výpočtu za velmi krátkou dobu, a to jak při lineární i nelineární analýze (Vierlinger 2013). Při změně vstupních parametrů je tedy možné zobrazit výsledky s okamžitou odezvou.

Plochám, které byly vytvořeny v předešlém kroku, byly pomocí komponent Karamby přiřazeny materiálové a průřezové charakteristiky, definovány kloubové podpory a zatížení. Staticky byla konstrukce uvažována jako prostě uložená deska. Velikost plošného zatížení je $5kN/m^2$ a celkem bylo uvažováno sedm zatěžovacích stavů:



Obrázek 4: Schéma zatížení.

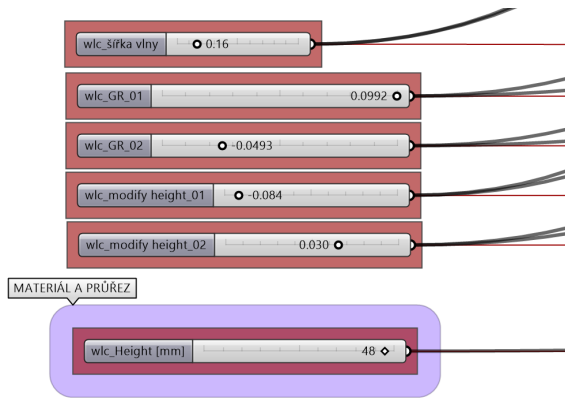


Obrázek 5: Průběh hlavního napětí σ_1 pro ZS1.

2.2. Vícekriteriální optimalizace

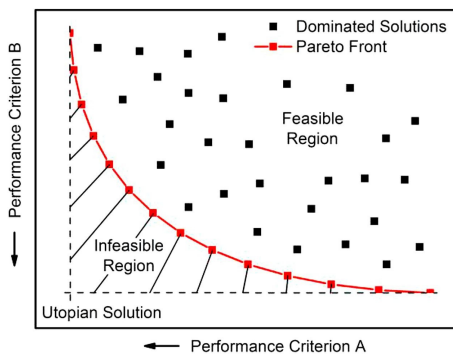
K nalezení optimálního tvaru konstrukce byl zvolen genetický algoritmus. Předmětem optimalizace byly polohy řídicích bodů a tloušťka nosné desky. Jednalo se celkem o 6 parametrů, které do úlohy vstupovaly v podobě tzv. jezdců. Jsou to GH komponenty, které nabývají číselné hodnoty v závislosti na poloze jezdce a zadaném rozsahu (viz. Obr. 6). V tomto případě se jednalo o 4565 různých hodnot a počet možných řešení byl $6,7 \cdot 10^{15}$.

²Voroného diagram je způsob rozdělení plochy na oblasti podle dané množiny bodů



Obrázek 6: Vstupní parametry v podobě jezdců.

Hodnoceno bylo celkem 5 kritérií: tloušťka desky, hmotnost konstrukce, průhyb, maximální tahové napětí a poměr celkového počtu konečných prvků k prvkům v tlaku. Jedná se tedy o více-kritériální optimalizaci, kde výsledkem není jedno řešení ale tzv. Pareto fronta. Na Obr. 7 je zobrazen graf, který představuje řešení optimalizační úlohy. Cílem bylo minimalizovat kritéria A a B. Červeně je znázorněna Pareto fronta a body, které se na ní nachází, představují nedominovaná řešení. To znamená, že žádné řešení v prostoru není stejné nebo lepší. A zároveň již nelze tato řešení vylepšit, aniž by bylo zhoršeno jedno z kritérií (Schweidtmann et al. 2018).

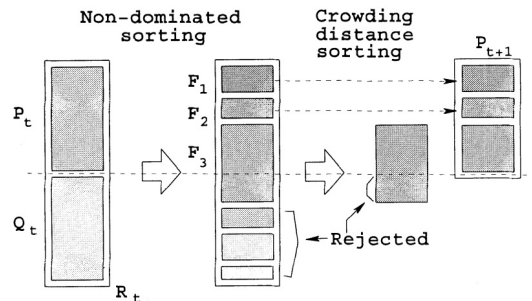


Obrázek 7: Pareto fronta (Schweidtmann et al. 2018).

Optimalizace byla provedena pomocí GH doplňku Wallacei X, který hledá minima jednotlivých kritérií a k nalezení Pareto fronty používá NSGA-II algoritmus³. Diagram daného algoritmu je zobrazen na Obr. 8. Na počátku je náhodně vytvořena výchozí populace P_0 o velikosti N . Ta je následně seřazena na základě dominance a každému řešení je přiřazené pořadí. Následují standardní genetické operátory (jako je turnajový výběr, křížení a mutace) a je vytvořena populace potomků Q_0 o velikosti N . Jelikož je každá další generace porovnávána s předešlým nejlepším nedominovaným řešením, jsou následující kroky algoritmu ukázány na generaci číslo t . Nejdřív je vytvořena populace R_t sloučením P_t a Q_t a je opět seřazena na základě dominance. Algoritmus pak zkontroluje násobnost dominance jedinců. Pokud jedinec není dominován žádným dalším řešením, přesouvá se na první místo v pořadí a je umístěn do množiny F_1 . Jedinci, které jsou dominováni právě jed-

³NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) je genetický algoritmus s nedominovaným řazením

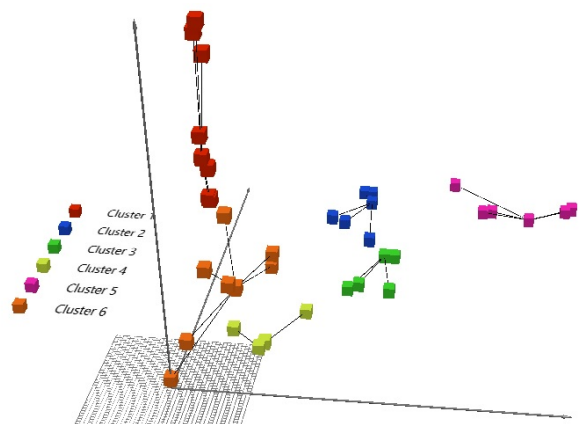
ním řešením, jsou přesunuty na druhé místo a jsou umístěny do množiny F_2 . Tento postup se provede u každého jedince. Množiny jsou následně seřazeny od F_1 po F_i a přenášá se do výchozí populace následující generace P_{t+1} . Po naplnění se celý proces opakuje s novou generací (Deb et al. 2002).



Obrázek 8: Diagram algoritmu NSGA-II (Deb et al. 2002).

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

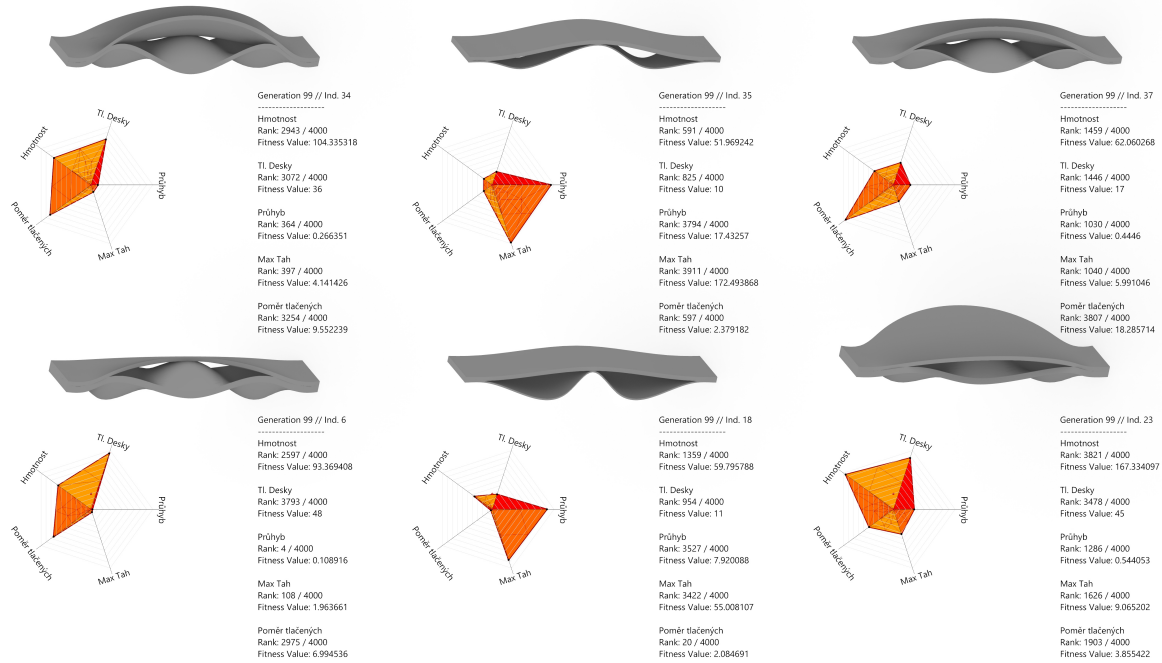
K interpretaci výsledků byly použity nástroje doplňku Wallacei X. Jedním z nich je i shluková analýza metodou k-průměrů (k-means clustering). Jedná se o způsob třídění dat na určitý počet shluků (počet k je parametr zadávaný uživatelem). Pro každý shluk je definován centroid, pro který platí, že součet vzdáleností jednotlivých objektů ve shluku je k tomuto centroidu minimální. Použitím eukleidovské vzdálenosti je centroidem vektor průměrů a jde tedy o metodu k-průměrů (Hricová 2011). Celý proces je iterační - nejdříve jsou náhodně zvoleny centroidy a jsou k nim přiřazeny objekty. V dalším kroku jsou centroidy přepočítány tak, aby šlo o těžiště shluků, a jsou k nim opět přiřazeny objekty. Tyto kroky se opakují, dokud se poloha centroidů neustálí. Na Obr.9 je znázorněno roztrídění poslední generace do šesti shluků.



Obrázek 9: Roztrídění poslední generace pomocí shlukové analýzy.

Na Obr. 13 je pak zobrazen PCP graf⁴ pro šest centroidů téže generace, které byly nalezeny pomocí shlukové analýzy. Pět svislých os představuje hodnotící kritéria a lze na nich odečíst jednotlivé hodnoty pro každý z centroidů.

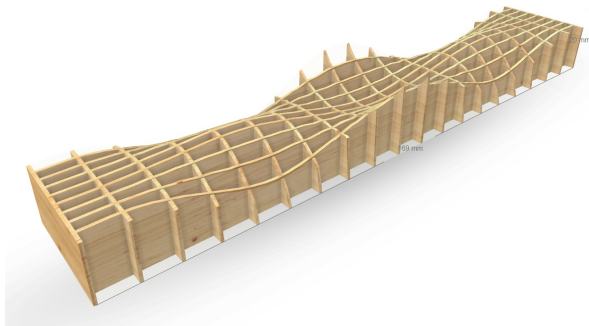
⁴Parallel Coordinate Plot - graf s rovnoběžnými souřadnicemi



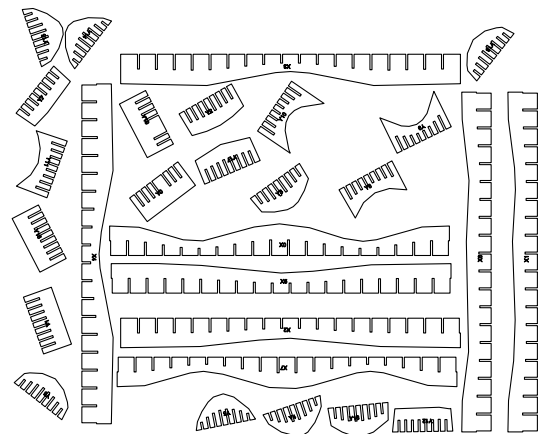
Obrázek 10: Přehled tvarů a hodnotících parametrů šesti centroidů té generace.

Tabulka 1: Přehled hodnot parametrů šesti centroidů té generace.

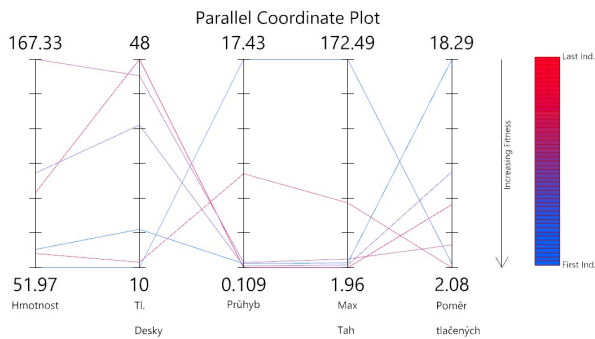
Gen. č.100 Jedinec	Kritéria	Hmotnost [kg]	TL. Desky [mm]	Průhyb [mm]	Max. Tah [MPa]	Poměr tlačných prvků [-]
č. 6		93.37	48	0.11	1.96	6.99
č. 18		59.80	11	7.92	55.01	2.08
č. 23		167.33	45	0.54	9.07	3.855
č. 34		104.34	36	0.27	4.14	9.55
č. 35		51.97	10	17.43	172.49	2.38
č. 37		62.06	17	0.44	5.99	18.29



Obrázek 11: 3D pohled na bedněň



Obrázek 12: Podklad pro CNC stroj.



Obrázek 13: Graf s rovnoběžnými souřadnicemi pro dvanáct centroidů.

Na Obr. 9 jsou zobrazeny tvary šesti centroidů generace č.100, včetně hodnot parametrů a radarového grafu, což je obdoba PCP grafu. Pro přehlednost jsou tyto parametry zobrazeny v Tab. 1. Šedě jsou zvýrazněny nejnižší hodnoty parametrů. Tmavě je pak zvýrazněn jedinec č. 37, který má nejnižší průměr těchto hodnot.

Dalším krokem by byla příprava bednění a zhotovení lávky. K tomu lze přímo využít vybraný optimalizovaný tvar a v prostředí Grasshopper 3D vytvořit parametrický model bednění např. v podobě tzv. waffle structure (viz. Obr. 11). Tento model bednění lze opět pomocí nástrojů GH rozložit na jednotlivé komponenty a upravit tím podklad pro CNC obráběcí stroj.

4. ZÁVĚR

Na tomto příkladě optimalizace betonové lávky byly ukázány možnosti a s nimi spojené výhody vizuálního programování. Bez větších znalostí programovacích jazyků lze efektivně definovat celou úlohu. Pomocí předem připravených komponent lze provést nejen statický výpočet, ale např. i analýzu klimatických podmínek, energetické simulace, optimalizaci pomocí evolučních algoritmů a získaná data rovnou použít pro digitální fabrikaci. Implementace vizuálního programování v praxi pomůže zrychlit digitalizaci stavebnictví a zvýšit efektivitu a konkurenceschopnost stavebních inženýrů a architektů.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS21/044/OHK1/1T/11.

Reference

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002), 'A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii', *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* **6**(2), 182–197.
- Hricová, J. (2011), Metoda k-průměrů, Master's thesis, Univerzita Karlova v Praze.
- Schweidtmann, A. M., Clayton, A. D., Holmes, N., Bradford, E., Bourne, R. A. & Lapkin, A. A. (2018), 'Machine learning meets continuous flow chemistry: Automated optimization towards the pareto front of multiple objectives', *Chemical Engineering Journal* **352**, 277–282.
- Vierlinger, R. (2013), Multi objective design interface, Master's thesis, University of Applied Arts Vienna.