

VIZE NAVRHOVÁNÍ OBLOUKOVÉ BETONOVÉ KONSTRUKCE S VYUŽITÍM MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ

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 vizí návrhu a výstavby obloukové betonové konstrukce s využitím moderních technologií (jako např. BIM, parametrické a generativní navrhování, digitální fabrikace apod.). Přejít na tyto metody umožňuje usnadnění a zrychlení procesů, zvýšení bezpečnosti a efektivity. Vzhledem ke zvoleným technologiím (robotizace a prefabrikace) a postupu výstavby byla zároveň nutná optimalizace výchozího tvaru konstrukce. Pro optimalizaci byl vybrán genetický algoritmus, a to pro jeho efektivitu a univerzálnost. Celý algoritmus včetně výpočtu pomocí metody konečných prvků byl implementován v jazyce Python. V závěru jsou představeny výsledky optimalizace spolu s výhodami a nevýhodami daného přístupu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotizace • Digitální Fabrikace • Genetický Algoritmus • Optimalizace • Python • Metoda konečných prvků

ABSTRACT

This article deals with the vision of design and construction of an arch structure using modern technologies (such as BIM, parametric and generative design, digital fabrication etc.). Transition to these methods can lead to facilitation and process acceleration or safety and efficiency improvement. Due to used technologies (robotization and prefabrication) and construction progress, an optimization of default shape was needed. A genetic algorithm was selected for its versatility and efficiency to optimize the initial shape. The whole algorithm (including finite element method analysis) was compiled in Python language. At the end, the results of optimization are introduced along with advantages and disadvantages of such an approach.

KEYWORDS

Robotization • Digital Fabrication • Genetic Algorithm • Optimization • Python • Finite element method

1. ÚVOD

Již několik let probíhá ve světě tzv. čtvrtá průmyslová revoluce. Jedná se o označení trendu digitalizace ekonomiky, automatizace výroby a vzniku moderních pracovišť. A zatímco v ostatních odvětvích ekonomiky produktivita rostla, ve stavebnictví můžeme pozorovat stagnaci. Řešením by mohl být přechod na Průmysl 4.0. Podmínkou přechodu na tento systém je výše zmíněná digitalizace a využití moderních technologií - takových jako BIM (informační modelování staveb), parametrické a generativní navrhování, digitální fabrikace apod. Návrhy budov s využitím těchto technologií často vedou k tzv. tvarům volných forem. Kvůli vysoké ceně se realizace takových návrhů často omezují jen na designové projekty (Kovářík et al. 2018). Jedním z takových případů by mohl být Cloud Arch v Sydney (Obr. 1a). Jedná se o návrh zakřiveného oblouku o výšce 58 a rozpětí 53 metrů, který má reprezentovat tvar oblaku. Tento článek má za cíl stručně seznámit s možným postupem při návrhu a realizaci obloukové konstrukce s využitím výše zmíněných technologií.



(a) Cloud Arch, Sydney - původní a nový návrh oblouku (Jefferson 2017).



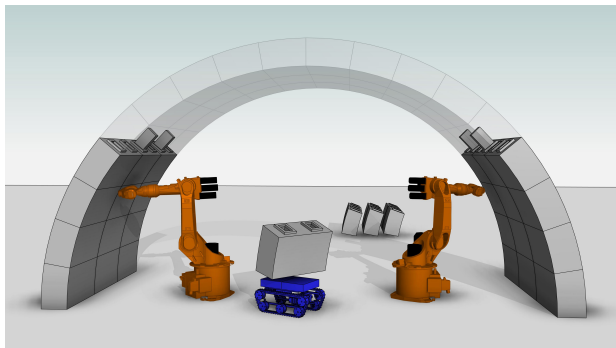
(b) Gateway arch, St. Louis (Balasko 2015).

Obrázek 1: Obloukové konstrukce jako umělecká díla umístěna ve veřejném prostoru.

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

2. VIZE

Vize návrhu i výstavby je ukázána na modelovém případu, který byl inspirován konstrukcí oblouku Cloud Arch. Vybrané postupy nejsou rozebrány do hloubky, ale jedná se spíše o seznámení s problematikou. Pro větší přehlednost je návrh a výpočet realizován na symetrické převážně tlačené konstrukci (Obr.2).



Obrázek 2: Robotizace a postup výstavby.

2.1. Robotizace a prefabrikace

Nyní značná část stavební výroby probíhá in situ a přes široké využití mechanizace se stále spoléhá na manuální práci. To má vliv na kvalitu, efektivitu a bezpečnost výroby. Cestou, jak vyhovět rostoucím požadavkům na stavby a jak realizovat digitálně navržené tvary, je digitalizace výrobních metod a s ní spojená robotizace (Kovářík et al. 2018). Tyto nástroje umožní zbavit se papírové dokumentace, usnadnit a zrychlit proces výstavby a zvýšit jeho bezpečnost.

V modelovém příkladu je uvažováno s plnou robotizací výstavby. Roboti budou rozděleni do několika skupin - jedna skupina bude mít za úkol samotnou výstavbu konstrukce, druhá distribuci stavebního materiálu po staveništi a další bude pomáhat při drobných úkonech (např. kontrola tvaru nebo zvýšení stability konstrukce během výstavby v podobě dočasných podpor). S tím je spojena i prefabrikace stavby. Předpokládá se, že se konstrukce bude skládat z jednotlivých betonových bloků, které se zmonolitní na místě. Zároveň se počítá s tím, že výroba bloků bude probíhat v rámci staveniště a v konstrukci budou použity již po cca po 6-8 hodinách.

2.2. Optimalizace tvaru

Vzhledem ke zvolené technologii a postupu výstavby bude výsledný tvar zatížené konstrukce odlišný od požadovaného (Obr.4). Pro odstranění tohoto nedostatku je nutné tvar poupravit. Jako nástroj pro nalezení výchozí geometrie byl zvolen genetický algoritmus. Jedná se o negradientní metodu optimalizace, která je založena na náhodě a na darwinovském principu evoluce. Celý algoritmus byl vytvořen v jazyce Python, a to kvůli využití tzv. objektově orientovaného programování. Jedná se o způsob programování, ve kterém se objektům (např. konstrukce) dají přiřadit vlastnosti a schopnosti (rozměry, materiál, zatížení, podpory apod.).

Vytvořený algoritmus se skládá z následujících kroků:

• Inicializace

Náhodné vygenerování počáteční populace o velikosti 40 jedinců (konstrukcí). Tvar každého jedince je vytvořen náhodnou modifikací souřadnic požadovaného tvaru (viz tvar nejlepšího jedince z páté generace na Obr. 8).

• Výpočet pomocí MKP

Výpočet konstrukce pomocí metody konečných prvků (viz Kap. 2.3).

• Ohodnocení

Přiřazení ohodnocení (fitness) každému jedinci v populaci. Hodnotila se velikost rozdílu mezi deformovanou konstrukcí a požadovaným tvarem.

• Výběr

Náhodný pořadový výběr (Hynek 2008), kdy vyšší pravděpodobnost pro výběr mají jedinci s nejnižší hodnotou fitness.

• Křížení

Multiplikativní křížení (Hynek 2008) dvou vybraných jedinců.

• Mutace

Náhodná změna tvaru vybraných jedinců.

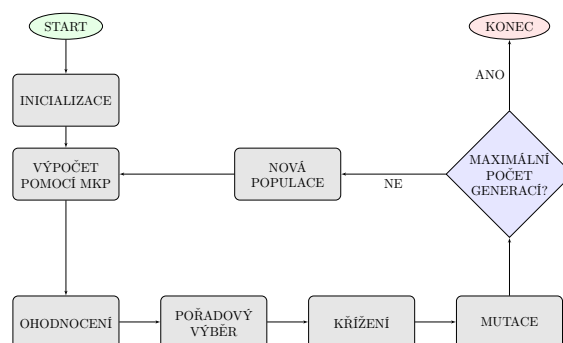
• Nová populace

Vytvoření nové populace, která se skládá ze dvou nejlepších jedinců předchozí generace, 28 potomků a 10 nově vygenerovaných jedinců. Přidání nových jedinců má za úkol zvýšit diverzitu a snížit pravděpodobnost degenerace celé populace.

• Opakování/ukončení

Proces se opakuje, dokud není dosažen zadaný počet generací - tj. 50.

Následující vývojový diagram představuje grafické znázornění algoritmu:



Obrázek 3: Diagram vytvořeného genetického algoritmu

2.3. Výpočet pomocí MKP

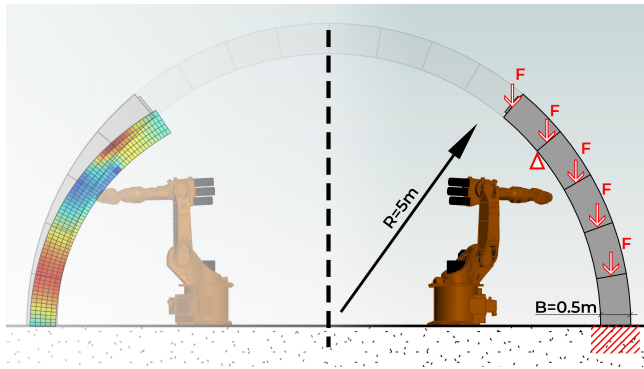
Výpočet vychází ze základní rovnice deformační metody:

$$K \cdot r = F \quad (1)$$

Při výpočtu byly použity bilineární čtvercové prvky a využita numerická integrace pro výpočet matice tuhosti. Pro řešení problému rovinné napjatosti byly použity následující rovnice v maticovém tvaru (Buchanan 1995):

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2)$$

kde u, v jsou posuny uzlů konečných prvků.



Obrázek 4: Schéma výpočetního modelu

Hledaný tvar obloukové konstrukce má následující parametry: poloměr $R = 5m$, šířka $B = 0.5m$ a tloušťka $t_l = 0.5m$. Oblouk byl rozdělen na 18 stejných segmentů. Výpočet byl prováděn pro každý krok výstavby (viz Obr. 9). Pro zrychlení výpočtu bylo využito symetrie konstrukce. Dále bylo uvažováno s dočasnými podporami, které se aktivují po překročení stanoveného tahového napětí. Tyto podpory reprezentují pomocné roboty, kteří mají za úkol zvýšení stability nedokončené konstrukce (viz Kap.2.1).

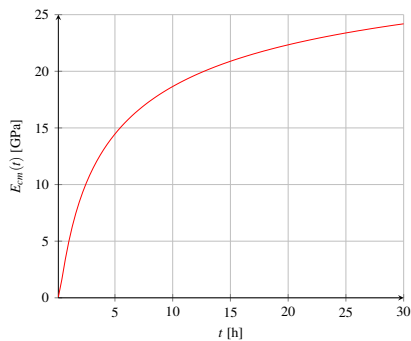
Během výstavby byla konstrukce zatížena pouze vlastní tíhou. Po dokončení bylo přidáno zatížení o velikosti $F = 3kN$, které reprezentuje ostatní stáje zatížení (možné opláštění, osvětlení, další umělecké prvky). Další zatížení, které by mohlo ovlivnit návrh (např. zatížení větrem), nebylo zohledněno. Předpokládá se, že výstavba bude probíhat za příznivých klimatických podmínek. Statické schéma včetně podpor a zatížení je patrné z Obr. 4.

Stáří betonu bylo zohledněno pomocí modulu pružnosti. Předpokládá se, že bloky budou umístěny po 6h od jejich zhotovení. Umístění následujících bloků bude probíhat ve dvouhodinových intervalech. Dle ČSN EN 1992-1-1 je vývoj modulu pružnosti popsán následovně:

$$E_{cm}(t) = E_{cm} \cdot \left[e^{s \cdot (1 - \sqrt{28/t})} \right]^{0.3} \quad (3)$$

kde E_{cm} je střední hodnota modulu pružnosti a s je koeficient zohledňující pevnostní třídu cementu.

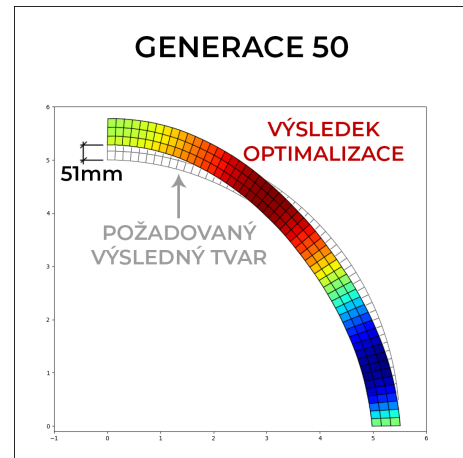
Pro beton C30/37 ($E_{cm} = 32GPa$) a CEM 42,5N ($s = 0.25$) platí následující graf závislosti modulu pružnosti na čase :



Obrázek 5: Vývoj modulu pružnosti v čase.

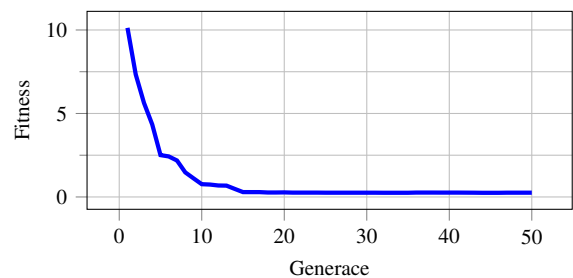
3. VÝSLEDKY A DISKuze

Výsledky optimalizace jsou vidět na Obr. 8. Z náhodně vytvořeného tvaru se díky genetickému algoritmu postupně stává pravidelný symetrický tvar. Nejlepší jedinec poslední generace je zobrazen na Obr. 6, kde je vidět rozdíl oproti požadovanému tvaru. Tyto výsledky by pak mohly být použity pro výrobu jednotlivých bloků (CNC výroba bednění nebo 3D tisk), tvorbu BIM modelu nebo kontrolu během výstavby.



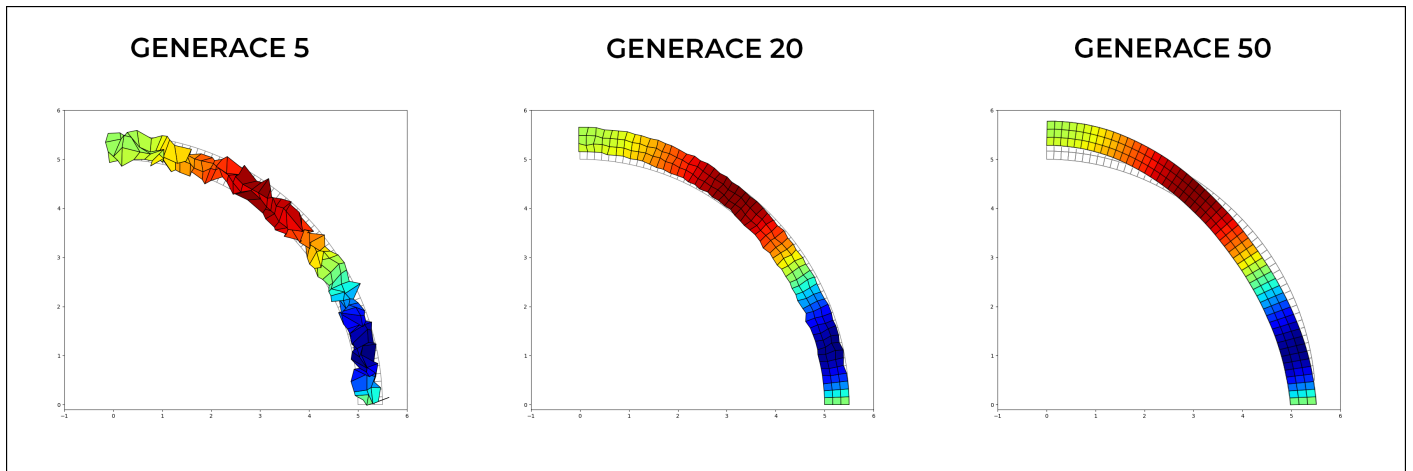
Obrázek 6: Tvar získaný optimalizací.

O funkčnosti algoritmu taky vypovídá graf na Obr. 7, kde je zobrazen vývoj hodnoty fitness (rozdíl oproti požadovanému výslednému tvaru) nejlepšího jedince. Je vidět, že tato hodnota postupně klesala. V posledních generacích tento pokles nebyl tak výrazný - jednak rozdíly už nebyly tak velké (v řádech milimetru) a zároveň zde docházelo pouze k vyhlazení tvaru (získání pravidelného symetrického tvaru).

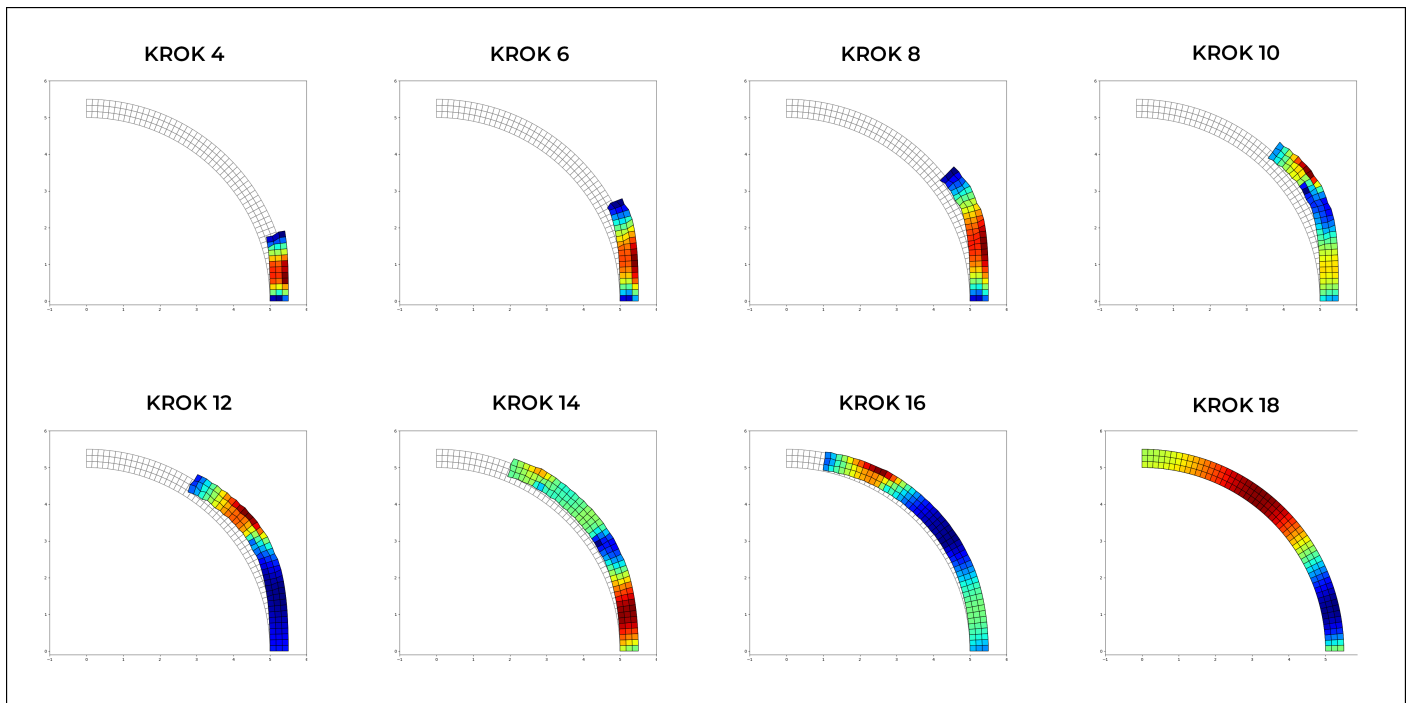


Obrázek 7: Graf vývoje fitness nejlepšího jedince populace.

Na Obr. 9 je pak vidět optimalizovaný tvar konstrukce ve vybraných krocích výstavby. V počátečních krocích je patrné nadvýšení oproti požadovanému tvaru (zobrazen šedě). Ke konci jsou tyto tvary totožné.



Obrázek 8: Přehled tvarů nejlepších jedinců vybraných generací.



Obrázek 9: Tvar konstrukce ve vybraných krocích výstavby.

4. ZÁVĚR

Z modelového příkladu je patrné, že využití moderních technologií by mohlo mít následující výhody:

- zvýšení bezpečnosti, efektivity a zrychlení výstavby díky robotizaci a prefabrikaci
- zvýšení přesnosti výsledné konstrukce díky optimalizaci tvaru
- využití výsledků optimalizace k tvorbě BIM modelu a zbavení se papírové dokumentace

Nevýhodou stále zůstává vysoká cena, značné omezení některých technologií a jejich nedostatek na trhu. Dá se však očekávat, že díky inovacím v oblasti technologií a materiálů budou stávající procesy postupně nahrazeny.

Dalším krokem tohoto výzkumu by mohla být realizace celého projektu v menším měřítku.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS20/043/OHK1/1T/11.

Reference

Balasko, R. (2015), 'Panoramic view of st. louis'. [online; citováno 06.09.2020].

URL: <https://www.shutterstock.com/cs/image-photo/panoramic-view-st-louis-77680642>

Buchanan, G. R. (1995), 'Theory and problems of finite element analysis. Schaum's outline series'.

Hynek, J. (2008), *Genetické algoritmy a genetické programování*, Grada Publishing as.

Jefferson, D. (2017), 'Before and after: the original and revised designs for cloud arch'. [online; citováno 06.09.2020].

URL: <https://www.timeout.com/sydney/blog/sydneys-getting-a-new-public-artwork-and-its-twice-as-big-as-originally-planned-082517>

Kovářík, M., Svoboda, P. & Štemberk, P. (2018), 'Přehled dostupných technologií 3d tisku z cementových malt', *BETON TKS* **2018**(2), 3–16.