



Slovenská technická univerzita v Bratislave
Stavebná fakulta

Meno a priezvisko

Andrej Bisták

Autoreferát dizertačnej práce

Využitie simulačného modelovania pri príprave výstavbového procesu

na získanie akademického titulu doktor („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe:

Technológia stavieb

v študijnom odbore:

Stavebníctvo

Forma štúdia:

denná forma

Miesto a dátum: Bratislava, máj 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedra technológie stavieb, Stavebná fakulta STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Andrej Bisták

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Katedra technológie stavieb

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Zdenka Hulínová, PhD.

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Katedra technológie stavieb

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti:

prof. Ing. Gabriel Fedorko, PhD.

Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií TU v Košiciach

Ústav logistiky a dopravy

Park Komenského 14, 042 00 Košice

doc. Ing. Pavel Svoboda, CSc.

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Katedra technologie staveb

Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Česká republika

Ing. Miriam Matúšová, PhD.

Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave

Ústav výrobných technológií, Katedra výrobných zariadení a systémov

Jána Bottu 25, 917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný: 29. júla 2020

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 24.8.2020 o 11.00 h.

v knižnici Katedry technológie stavieb Stavebnej fakulty STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
dekan fakulty

ABSTRAKT

Proces výstavby je charakteristický rozmanitou technologickou skladbou a širokým rozsahom využitia stavebných strojov a mechanizácie. Ich množstvo so zložitou stavby vzrastá, čo zvyšuje nároky na prípravu a celkovú organizáciu výstavby. Pri modelovaní stavebných procesov je rozhodujúcou úlohou zvoliť taký druh modelu, ktorý nás čo najefektívnejšie privedie k požadovanému cieľu. Príprava stavebných procesov realizovaných vrtuľníkmi (leteckých prác) musí rešpektovať vplyv náhodne sa meniacich podmienok výstavby a súčasne špecifické podmienky práce vrtuľníkov. Zložitosť takého systému je možné modelovať pomocou simulačných modelov. V predloženej práci sme navrhli, zostavili a prakticky overili simulačný model leteckých prác v prostredí softvéru MATLAB. Podstatnou charakteristikou modelu je riešenie vplyvu poveternostných podmienok na realizáciu výstavby vrtuľníkmi, ktorého algoritmus je navrhnutý na báze komerčne používaných numerických modelov predpovede počasia, ako sú modely IFS, ALADIN a A-LAEF. Výstupy simulácie považujeme za vierohodné, pretože sa veľmi približujú ku skutočne dosahovaným výsledkom v prípade realizácií stavieb tohto typu. Koncepcia simulačného modelu je otvorená a umožňuje širšie využitie ako v segmente stavebnej výroby, tak v iných priemyselných odvetviach.

Kľúčové slová: simulačný model, vrtuľník, stavebné procesy, numerická predpoveď počasia, logistika

OBSAH

ÚVOD	4
1 ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	5
2 CIELE A TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE	9
3 METÓDY SKÚMANIA	10
4 RIEŠENIE PROBLÉMU	11
5 DISKUSIA	18
6 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	19
7 ZÁVER	20
ZOZNAM VYBRANEJ POUŽITEJ LITERATÚRY	20
ZOZNAM VYBRANÝCH PUBLIKOVANÝCH PRÁC AUTORA	22

ÚVOD

Naša spoločnosť v súčasnosti prechádza štvrtou priemyselnou revolúciou, ktorá podstatným spôsobom ovplyvňuje charakter výroby a foriem práce (*Industry 4.0*). Vo všetkých oblastiach priemyslu sa stávajú dominantnými informačné technológie založené na najmodernejšej výpočtovej technike. Tá sa už pomerne dávno stala bežnou súčasťou každej domácnosti a jej vývoj napreduje v nebývalom rozsahu, takpovediac zo dňa na deň. Preto niet divu, že svoje uplatnenie nachádza čoraz častejšie aj v priemysle, a to v stále sofistikovanejších podobách.

Na tento vývoj, aj keď s istým oneskorením, reaguje aj samostatná oblasť priemyslu - stavebníctvo. Najmä v segmente stavebnej výroby (samotnej výstavby) sa prejavuje istá zotrvačnosť, čo je pravdepodobne dané špecifickými vlastnosťami výroby stavieb (práca na otvorenom pracovisku, premiestňovanie výrobných zariadení, dlhé výrobné lehoty, značný podiel manuálnej a stále ťažko automatizovateľnej práce), dlhoročnou stavebnou tradíciou a empirizmom (stavby v rôznych podobách sprevádzajú ľudstvo od jeho počiatkov) či širokým rozsahom a premenlivou náročnosťou stavieb (od rodinného domu cez diaľnice, železnice, mosty a tunely až po mrakodrapy dosahujúce výšku stoviek metrov). O niečo dynamickejšie reaguje segment výroby stavebných materiálov, ktorý sa svojím charakterom veľmi nelíši od iných priemyselných prevádzok, a tiež projekčná a architektonická činnosť, ktorá už dosiahla značný stupeň informatizácie (postupné zavádzanie technológie BIM pre 3D a n-D projektovanie, využitie virtuálnej, resp. rozšírenej reality a pod.)

Predovšetkým pri náročnejších stavbách sa ukazuje potreba vyššej kontroly nad priebehom ich výstavby, a to už počas prípravnej etapy, kedy je ešte možné podstatne ovplyvniť výslednú podobu. Prudký rozvoj výpočtovej techniky vytvoril doslova na stavenisku, v notebooku pripravovateľa stavby, podmienky pre využitie aj takých pokročilých nástrojov, ktoré boli v minulosti doménou inštitucionálnych sálových počítačov. Medzi tieto nástroje patrí aj, v stavebnej výrobe ešte stále často podceňované, simulačné modelovanie. Jeho praktické použitie je v dnešnej dobe možné práve vďaka vzniku a postupnej miniaturizácii počítačov a s tým súvisiacim masovým rozšírením výpočtovej techniky.

Proces výstavby, niekedy nazývaný aj výstavbový proces, je vo všeobecnosti charakteristický rozmanitou technologickou skladbou a širokým rozsahom využitia stavebných strojov a mechanizácie, a tým aj spolupôsobením pracovných čiat rozličných počtov a profesií. Ich množstvo so zložitou stavbou vzrastá, čo zvyšuje nároky na koordináciu a organizáciu výstavby. Takto definovaný systém obsahuje mnoho vzájomne sa ovplyvňujúcich činiteľov, ktorých správanie sa neraz nie je možné exaktne predvídať. Stavebno-technologická príprava stavieb preto zaujíma v procese uskutočňovania stavby mimoriadne dôležitú úlohu (AbouRizk et al. 2011).

Dopravné kongescie, poruchy strojov a dopravných prostriedkov, nepriaznivé poveternostné podmienky či indispozícia zamestnancov ovplyvňujú nielen intervaly príchodu vozidiel na stavenisko, časy trvania manipulácie, nakládky, vykládky, ale aj prácu hlavných

stavebných strojov, a tým v neposlednom rade trvanie samotných stavebných procesov. Miera tohto vplyvu sa v čase mení a má náhodný (pravdepodobnostný) charakter.

Atmosférické vplyvy výrazne ovplyvňujú výber technológie a priebeh stavebných prác aj v prípade klasického pozemného spôsobu výstavby. V niektorých prípadoch je však nutné stavbu realizovať značne odlišným spôsobom - pomocou *vrťuľníkov*, a v tom prípade je vplyv klimatických podmienok ešte väčší. Stavebné práce uskutočňované vrťuľníkmi sa v zmysle § 44 Zákona č. 143/1998 Z. z. o civilnom letectve (letecký zákon) a o zmene a doplnení niektorých zákonov označujú aj ako *letecké práce*.

Vrťuľníky sa pohybujú v trojrozmernom priestore (v atmosfére), a sú teda pri práci výrazne zasahované poveternostnými podmienkami. Myšlienka náhodnosti takého výrobného procesu musí preto rešpektovať aj iné faktory, špecifické pre prácu vrťuľníkov, a to najmä teplotu a tlak vzduchu, nadmorskú výšku a rýchlosť i smer vetra, v odbornej terminológii súhrnne nazývané ako *meteorologické prvky*.

Práca vrťuľníkov je tak ovplyvnená nielen momentálnymi poveternostnými podmienkami v mieste výstavby, ale tiež širokým spektrom okolností, bežných v podmienkach konvenčnej stavebnej výroby. Vo fáze stavebno-technologickej prípravy stavby má pritom technolog k dispozícii rozličné metódy s nižším či vyšším stupňom náročnosti, a tým aj s nižšou či vyššou mierou presnosti získaných výsledkov.

Príprava stavebných prác využívajúcich vrťuľníky pomocou tradičných a jednoduchších deterministických algoritmov je v dôsledku uvedených osobitostí leteckých prác značne komplikovaná až nemožná. Priblížiť sa ku skutočnosti, odohrávajúcej sa za podmienok charakteristických pre letecké práce, nám skôr umožní simulačné modelovanie, pomocou ktorého vieme napodobniť náhodný charakter stavebnej výroby (Hulínová 2011).

Podstatou simulačného modelovania je vytvorenie počítačového modelu stavebného procesu tak, ako by prebiehal v skutočnosti, a následné experimentovanie so zostaveným modelom (AbouRizk et al. 2011).

1 ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Hlavnou úlohou pri modelovaní stavebných procesov realizovaných vrťuľníkmi je predovšetkým spoznať prácu vrťuľníkov a všetko, čo na ňu vplýva. V dôsledku toho má realizovaný výskum medziodborový charakter. Logické členenie takto koncipovanej prípravy stavebného procesu teda podmieňuje rozdelenie analýzy súčasného stavu na dva vzájomne súvisiace celky:

- využitie vrťuľníkov pri realizácii stavieb,
- využitie simulačného modelovania pri príprave stavieb.

1.1 Využitie vrťuľníkov pri realizácii stavieb

Vzhľadom k svojim vlastnostiam predstavujú vrťuľníky pre mnohé odvetvia praktické a nenahraditeľné dopravné prostriedky. Možnosť kolmého štartu a pristátia bez závislosti na

dlhých vzletových a pristávacích dráhach poskytuje vrtuľníkom neobyčajne široký operačný priestor, pretože na pristátie a štart nevyžadujú rozmernú ani špeciálne upravenú plochu. Netradičné manévrovacie schopnosti umožňujú vrtuľníkom vykonávať lety v tesnej blízkosti zeme. Nižšia dopravná rýchlosť vrtuľníkov oproti iným leteckým prostriedkom je v prípade dopravy bremien výhodou (Messingerová 2005).

Vrtuľníky sú schopné letieť všetkými smermi a na rozdiel od klasických lietadiel umožňujú aj zastavenie vo vzduchu - vísenie. Práve kombinácia týchto charakteristických vlastností umožnila využitie vrtuľníkov aj v stavebníctve. Prvopočiatky leteckých prác s použitím vrtuľníkov na území bývalého Československa siahajú do roku 1957, kedy bola experimentálne realizovaná doprava technického zariadenia na strechu 42 m vysokej budovy (Jindra 1965).



Obr. 1.1: Výstavba sedačkovej lanovej dráhy Turecká - Krížna pomocou vrtuľníka Mi-8 (archív p. Martina Vajsa)

Hlavným iniciátorom využitia vrtuľníkov v segmente stavebno-montážnych prác vo vtedajšom Československu bol podnik Transporta, n.p. Chrudim, ktorý vyrábal o. i. aj lanové dráhy a mal záujem na zefektívnení realizácie stavieb v náročných podmienkach, v tej dobe stále málo mechanizovaných (Hrubeš 1988). S využitím, na tento účel mimoriadne vhodného, vrtuľníka typu Mi-8 bola od roku 1968 „sériovo“ realizovaná výstavba viacerých zariadení, napr. aj sedačkovej lanovky Turecká - Krížna vo Veľkej Fatre (obr. 1.1).

V Slovenskej republike v súčasnosti pôsobia, podľa registra Dopravného úradu (DÚ), Divízie civilného letectva, na trhu leteckých prác v oblasti stavebníctva dve spoločnosti, ktoré ich uskutočňujú s vrtuľníkmi typu Mi-8 a Mi-171 (modernizovaná verzia typu Mi-8) (DÚ 2020):

- UTair Europe, s. r. o. (letisko Piešťany),
- TECH-MONT Helicopter company, s. r. o. (letisko Spišská Nová Ves).

Poveternostné podmienky výrazne ovplyvňujú nosnosť vrtuľníka, ktorá je z hľadiska technológie výstavby najzávažnejšia. Na rozdiel od bežných zdvíhacích prostriedkov, maximálna nosnosť vrtuľníka nie je konštantná, ale mení sa v čase. Z tohto dôvodu sa v etape prípravy leteckých prác bezpodmienečne musí zohľadniť priebeh poveternostných podmienok na budúcom stavenisku v čase realizácie. V praxi majú na stanovenie skutočnej nosnosti

vrťuľníka zásadný vplyv iba niektoré meteorologické prvky, preto môžeme uvedenú závislosť pre známu lokalitu využitia vrťuľníka matematicky vyjadriť nasledovne:

$$N_v = f(t, n, p, v_r, v_s, d) \quad (1.1)$$

kde N_v = nosnosť, resp. maximálna vzletová hmotnosť vrťuľníka, t = teplota vzduchu, n = nadmorská výška, p = tlak vzduchu, v_r = rýchlosť vetra, v_s = smer vetra, d = dohľadnosť. V leteckej praxi sa závislosť medzi teplotou vzduchu, nadmorskou výškou, rýchlosťou vetra a maximálnou vzletovou hmotnosťou vrťuľníka znázorňuje pomocou nomogramu. Nomogram platí pre konkrétny typ vrťuľníka a je súčasťou jeho dokumentácie. Ide o analógiu diagramu nosnosti, známeho z tradičných vežových alebo mobilných žeriavov.

Nosnosť vrťuľníka je v nomograme vyjadrená graficky podľa jednotlivých ovplyvňujúcich faktorov. Po odpočítaní tzv. štandardného nákladu a hmotnosti paliva, ktorá sa stanoví v závislosti od dĺžky letu, sa získa „skutočná“ nosnosť vrťuľníka, teda skutočná maximálna hmotnosť dopravovaného bremena. Nomogramy nosnosti pre vrťuľníky typov Mi-8 a Mi-17, ktoré sú v podmienkach nášho regiónu najpoužívannejšie, sú uvedené v prílohe č. 1 (Mi-8) a v prílohe č. 2 (Mi-17).

1.2 Využitie simulačného modelovania pri príprave stavieb

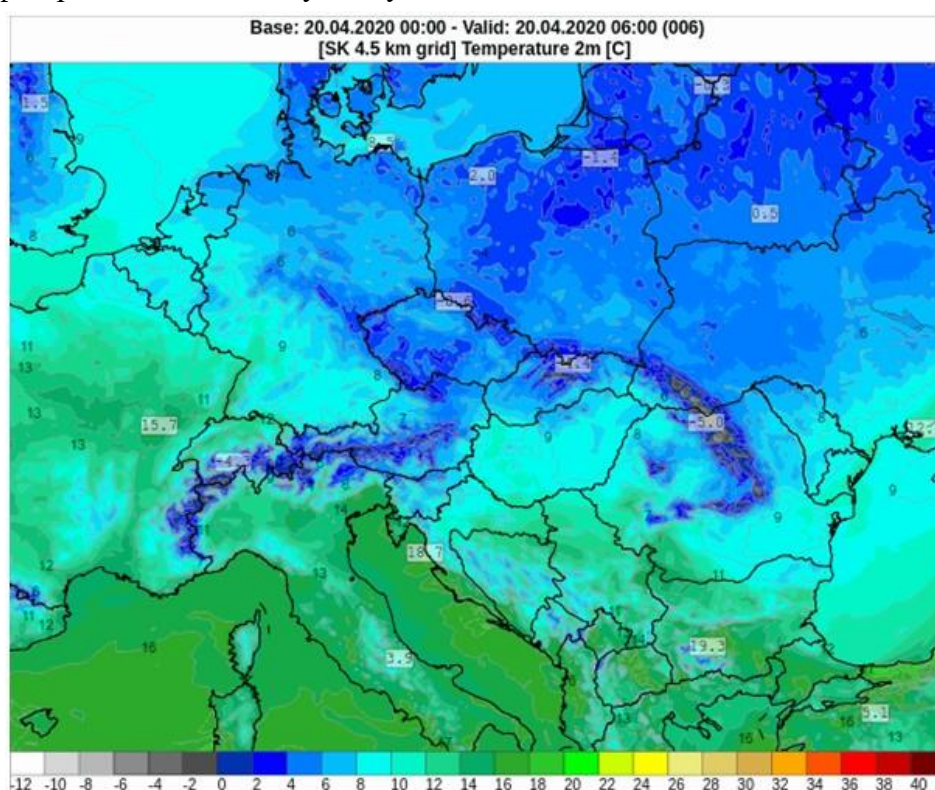
Využitie simulačného modelovania pri príprave stavieb bolo predmetom výskumu viacerých autorov, napr. Mahmoodzadeh a Zare (2016), ktorí sa zaoberali pravdepodobnostnou predikciou vplyvu očakávaných geologických podmienok, času trvania výstavby a celkových nákladov pri realizácii cestných tunelov. Podobnou problematikou sa zaoberali aj Liu et al. (2015), ktorí identifikovali výrazné riziko oneskorenia projektu v dôsledku pôsobenia nepriaznivých geologických vplyvov. Nezahrnutie vplyvu geologických podmienok do simulačného modelu spôsobuje podľa autorov pri časovom plánovaní podhodnotenie trvania projektu.

Alsudairi (2015) analyzoval možnosti simulačného prístupu v oblasti znižovania nákladov stavebného diela, skracovania času výstavby a údržby budov. Autori Song a Eldin (2012) sa zaoberali automatizovaným získavaním vstupných dát pomocou snímačov a ich následným použitím v simulačných modeloch umožňujúcich tvorbu krátkodobých časových plánov na báze aktuálnych operatívnych informácií. Poukázali tiež na významné obmedzenia tradičných spôsobov časového plánovania s využitím metódy kritickej cesty (CPM). Lindhard et al. (2019) hľadal spôsoby obmedzenia vplyvu premenlivosti stavebnej výroby pomocou rozličných zmien poradia a organizácie uskutočňovania jednotlivých činností.

Vo svojich prácach sa viacerí autori zaoberali aj simuláciou budúcich poveternostných podmienok a skúmaním ich vplyvu na proces uskutočňovania stavieb. Na zhodnotenie závažnosti tohto vplyvu viackrát úspešne použili simulačný prístup, napr. v prácach Lee et al. (2009) alebo Jung et al. (2016). Simuláciou procesu výstavby neobvyklých objektov, ako sú veterné elektrárne situované v mori, sa zaoberal Muhabie et al. (2018), ktorý okrem poveternostných podmienok simuloval aj výšku morských vln a stav morskej hladiny.

Ako vyplýva z analýzy súčasného stavu, výskum v oblasti simulačného modelovania pri príprave stavieb je len v počiatkoch a viacerí autori zdôrazňujú nevyhnutnosť publikovania ďalších prác, využívajúcich simulačný prístup. Vo svojich prácach sa už mnohí z nich zaoberali napr. simuláciou budúcich poveternostných podmienok a hodnotením ich vplyvu na proces uskutočňovania stavieb, avšak simulovali sa iba konvenčné procesy, najmä s využitím klasických žeriavov a iných bežných stavebných strojov.

V rámci riešenia dizertačnej práce sa z toho dôvodu zameriavame na problematiku simulačného modelovania stavebných procesov, a to konkrétne procesov realizovaných vrtuľníkmi (leteckých prác), so zohľadnením vplyvu poveternostných podmienok na túto činnosť v predpokladanom čase výstavby.



Obr. 1.2: Pole teploty vzduchu vo výške 2 m na výpočtovej doméne SHMÚ ALADIN 4,5 km (autor)

Poznámka: Ako sme uviedli v predchádzajúcom texte, aktuálne atmosférické podmienky v čase a mieste stavby majú zásadný vplyv na mnohé práce v stavebníctve. V dávnej minulosti bol faktor počasia braný do úvahy len na základe ročného obdobia. Pri odbornom dlhodobom plánovaní boli predchádzajúce všeobecné tvrdenia nahradené štatistickým spracovaním nameraných meteorologických údajov, získaných pomocou stálej siete meteorologických a klimatologických staníc národných meteorologických inštitútov.

Na Slovensku túto činnosť už 65 rokov zastrešuje Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ), ktorý je členom Svetovej meteorologickej organizácie (WMO). Pre dlhodobé plánovanie je korektné používať *klimatické normály* pre danú lokalitu, ako napríklad mesačnú

priemernú teplotu vzduchu, minimálnu mesačnú teplotu vzduchu a priemerný mesačný úhrn atmosférických zrážok. Tieto hodnoty tvoria dlhodobé priemerné ohraničenie počasia v danom období. Na predpoveď aktuálneho počasia v danom čase však slúžia *numerické predpovedné modely atmosféry*.

Numerickú predpoveď počasia v podmienkach Slovenskej republiky zabezpečuje SHMÚ (Belluš et al. 2019, Derková et al. 2017, Termonia et al. 2018, Wang et al. 2018). Napríklad, priamo na SHMÚ sa aktuálne počíta systém ALADIN (ALARO-1) cy40 s rozlíšením 4,5 km a s asimiláciou lokálnych prízemných meraní, ktorého výpočtová doména pokrýva Európu (obr. 1.2).

2 CIELE A TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

2.1 Ciele dizertačnej práce

Simulačné modelovanie je v súčasnej dobe rozšírené vo viacerých výrobných odvetviach, v poslednom období nachádza často uplatnenie napr. v strojárskom priemysle, kde bez neho nie je možné uskutočniť prakticky žiadny významný zásah do výrobného procesu. Stavebná výroba sa navyše vyznačuje viacerými špecifikami vhodnými pre uplatnenie simulačných metód, napriek tomu sa do dnešných dní simulačný prístup až na niekoľko výnimiek nevyužíva.

Z toho dôvodu je primárnym cieľom dizertačnej práce overiť vhodnosť použitia simulačného modelovania pri príprave stavieb, a tým vytvoriť podmienky pre jeho eventúálne využitie v praxi i vo výučbe. Navrhnutá metodika prispeje k tomu, že základné dokumenty stavebno-technologickej prípravy (časový plán výstavby, finančný plán a pod.) budú v konečnom dôsledku, prostredníctvom ich optimalizácie na báze výstupov simulačného modelu, presnejšie kopírovať realitu výstavby. Vďaka použitiu simulačných metód sa autenticita týchto dokumentov priblíži ku skutočnosti, odohrávajúcej sa na stavbe, čo významne zvýši ich výpovednú hodnotu.

2.2 Stanovenie hypotéz

Na základe analýzy súčasného stavu riešenej problematiky formulujeme niekoľko hypotéz:

1. Poveternostné podmienky ovplyvňujú schopnosť letu vrtuľníka a jeho skutočnú maximálnu nosnosť, čo má zásadný vplyv na:
 - časový plán výstavby a organizáciu práce,
 - normatívy spotreby času a práce.
2. Nosnosť vrtuľníka ovplyvňuje výslednú cenu, čas i kvalitu prác a tým aj pravdepodobnosť splnenia požadovaných kritérií.
3. Deterministický prístup nie je schopný zohľadniť všetky rozhodujúce faktory, z čoho vyplývajú nepresnosti v časovom a finančnom plánovaní.
4. Simulačné modelovanie umožňuje priblížiť sa stavebnej realite viac ako tradičné deterministické koncepcie.

5. Modelovanie práce vrtuľníkov môže priniesť potrebu vývoja nových prvkov, systémov a technológií, ktoré zrýchlia a zjednodušia prácu vrtuľníkov a znížia jej ovplyvniteľnosť meniacimi sa podmienkami počas výstavby.

2.3 Tézy dizertačnej práce

S úmyslom dosiahnuť uvedené ciele a overiť platnosť hypotéz navrhujeme pri riešení dizertačnej práce uplatniť nasledovné postupové kroky:

1. snímkovanie priebehu stavebných procesov (montážnych, príp. betonárskych) využívajúcich vrtuľníky, za účelom získania dokonalej znalosti sledu procesov uskutočňovaných na stavbe, vrátane vzájomných väzieb a závislostí medzi procesmi,
2. zostavenie simulačnej schémy pozorovaných stavebných procesov s využitím poznatkov získaných snímkovaním,
3. vytvorenie simulačného modelu stavebného procesu využívajúceho vrtuľníky na základe navrhutej simulačnej schémy,
4. verifikácia vytvoreného simulačného modelu prostredníctvom porovnania jeho výstupov s výstupmi už zrealizovaných skutočných procesov,
5. porovnanie výstupov simulačného modelovania s výstupmi získanými na základe deterministického prístupu s cieľom zhodnotenia významu a účinnosti simulačných metód pri príprave výstavby,
6. návrh a formulácia všeobecne platnej metodiky a vhodných odporúčaní pre prípravu leteckých prác v stavebníctve s využitím počítačovej simulácie.

3 METÓDY SKÚMANIA

Riešenie dizertačnej práce je primárne založené na využití princípov *počítačovej simulácie*, čo predstavuje predovšetkým zostavenie a verifikáciu simulačného modelu stavebného procesu realizovaného vrtuľníkmi. Pre výber vhodného procesu bolo rozhodujúce to, že práce s vrtuľníkmi sú tak komplikované, že ich príprava si vyžaduje použitie simulačného modelovania.

Na zostavenie simulačného modelu je potrebná hĺbková znalosť sledu procesov, uskutočňovaných na stavbe, vrátane vzájomných väzieb a závislostí medzi nimi. Tvorba simulačného modelu by nebola úspešná bez možnosti návštevy stavieb využívajúcich vrtuľníky, pretože zostavený model by nereflektoval autentickú realitu priebehu týchto prác. Pri zbere údajov na stavbe sa použila metóda *snímkovania práce*. Na Slovensku sa v súčasnosti leteckými prácami zaoberajú dve spoločnosti, s ktorými bolo možné nadviazať spoluprácu za účelom získavania potrebných podkladov.

Uvedené východiská sú nevyhnutným vstupom pre úspešné riešenie dominantnej časti dizertačnej práce – vytvorenie samotného simulačného modelu. Navrhovaný simulačný model zohľadňuje pôsobiace náhodné javy, predovšetkým spomenuté poveternostné podmienky, ktoré pri tejto technológii výstavby najviac vplyvajú na prácu vrtuľníka, a tým ovplyvňujú pre

postup výstavby najdôležitejšiu vlastnosť – jeho maximálnu nosnosť. Simulačný model je spracovaný v *programovacom prostredí MATLAB*; simulačnú schému, ktorá predchádza jeho implementácii, sme navrhli pomocou metódy *CYCLONE* a variantne s využitím štandardu *BPMN*.

Jadro algoritmu navrhovaného simulačného modelu, ktoré pracuje s poveternostnými podmienkami, môže byť vytvorené viacerými spôsobmi. Jeho použitie však vždy predpokladá, že meteorologické dáta sú, bez ohľadu na použitý spôsob ich získania, vzťahnuté k najbližšiemu geografickému bodu pri uvažovanom mieste výstavby. Pri riešení simulačného modelu sme využili *numerické modely predpovede počasia*, ktoré na Slovensku zabezpečuje a dodáva SHMÚ. Vytvorený simulačný model nám následne v experimentálnej rovine umožnil overovať rozličné technologické postupy a varianty vyhotovenia plánovanej stavby, využívajúcej vrtuľník, bez nutnosti procesy fyzicky uskutočňovať.

4 RIEŠENIE PROBLÉMU

4.1 Získavanie vstupných údajov

Letecké práce majú, ako sme už uviedli v predchádzajúcich častiach práce, najväčšie uplatnenie predovšetkým v exponovaných horských lokalitách či husto zastavaných územiach. Na rozdiel od konvenčných stavebných strojov, ktoré na stavbe bývajú prítomné typicky niekoľko dní až týždňov, skutočné nasadenie vrtuľníkov na stavbách sa pohybuje rádovo v minútach až hodinách, v špecifických prípadoch maximálne niekoľko dní.



Obr. 4.1: Vrtuľník na pristávacej ploche, vpravo autocisterna s leteckým palivom (autor)

Výsledkom vzájomného pôsobenia týchto faktorov, či skôr osobitostí „vrtuľníkových“ stavebných prác, je extrémna organizačná náročnosť pri získavaní vstupných údajov priamo na stavbách (snímkovaní procesov). Uvedené skutočnosti sa nám potvrdili aj pri snímkovaní v horskom meste Szczyrk (Poľsko), z ktorého pochádza väčšina vstupných údajov použitých v tejto práci.

V riešenej lokalite sa v roku 2017 realizoval ambiciózny projekt výstavby troch nových lanových dráh. Betonáž základových pätiiek a montáž traťových podpier všetkých lanoviek sa uskutočňovala pomocou vrtuľníka. Na túto akciu bol použitý vrtuľník typu Mi-8 s maximálnou nosnosťou bremena v podvese 3000 kg (obr. 4.1).

Počas nášho pozorovania 8. augusta 2017 prebiehala montáž podpier jednej z lanových dráh - kabínkovej lanovky typu Leitner GD10 na trase U Kowalskiego - Hala Skrzyczneńska. Spolu bolo potrebné osadiť 10 podpier rúrového prierezu. Podpery mali výšku 10,17 - 26,41 m, čomu zodpovedala ich celková hmotnosť v intervale 11 541 - 23 391 kg. Montáž podpier sa uskutočňovala postupne od hornej stanice smerom k dolnej stanici, a to na už pripravené železobetónové základové pätky so zabetónovanými kotevnými skrutkami.

S montážou podpier pomocou vrtuľníka sa v oblasti lanovej dopravy počíta už vo fáze projektovania, preto sú podpery navrhnuté a konštrukčne prispôsobené práve na tento spôsob montáže. Vzhľadom na ich hmotnosť, ktorá vysoko presahuje možnosti vrtuľníka, sa už vo výrobe rozdeľujú na stanovený počet segmentov (dielcov). Na kompletne zhotovenie jednej podpery je teda potrebné uskutočniť viacero letov. Za tým účelom výrobca ocelevej konštrukcie (de facto lanovej dráhy) poskytuje dodávateľovi leteckých prác tabuľky s uvedením presného počtu dielcov, ich výšok a hmotností, na základe ktorých realizátor vypracuje technologický postup montáže, najmä rozdelenie segmentov do jednotlivých letov.

4.2 Zostavenie simulačnej schémy

Nasledujúcim postupovým krokom je zostavenie simulačnej schémy a na jej základe vytvorenie samotného simulačného modelu leteckých prác. Na základe analýzy realizovaných leteckých prác, poznatkov získaných snímkaním v teréne a odborných konzultácií sme stanovili technologický postup realizácie leteckých prác, ktorý sme následne podrobili hĺbkovej analýze za účelom stanovenia rozsahu činností, ktoré ovplyvňujú trvanie jedného letového cyklu vrtuľníka.

Z analýzy vyplynulo, že čas trvania letového cyklu môžeme ovplyvniť iba vo fáze zavesenia bremena a jeho navedenia do priestoru vykládky a vo fáze zvesenia bremena. Čas trvania jedného letového cyklu potom matematicky vyjadríme nasledovne:

$$t_c = t_{bz} + t_z + t_{ln} + t_s + t_{bo} + t_{lp} \quad (4.1)$$

kde t_c = čas trvania letového cyklu, t_{bz} = čas potrebný na zavesenie bremena, t_z = čas potrebný na zrýchlenie vrtuľníka na preletovú rýchlosť, t_{ln} = čas potrebný na let vrtuľníka preletovou rýchlosťou na miesto stavby, t_s = čas potrebný na spomalenie vrtuľníka na nulovú rýchlosť, t_{bo} = čas potrebný na odpojenie bremena, t_{lp} = čas potrebný na let (návrat) vrtuľníka na skládku, vrátane časov potrebných na zrýchlenie a následné spomalenie na nulovú rýchlosť na mieste skládky.

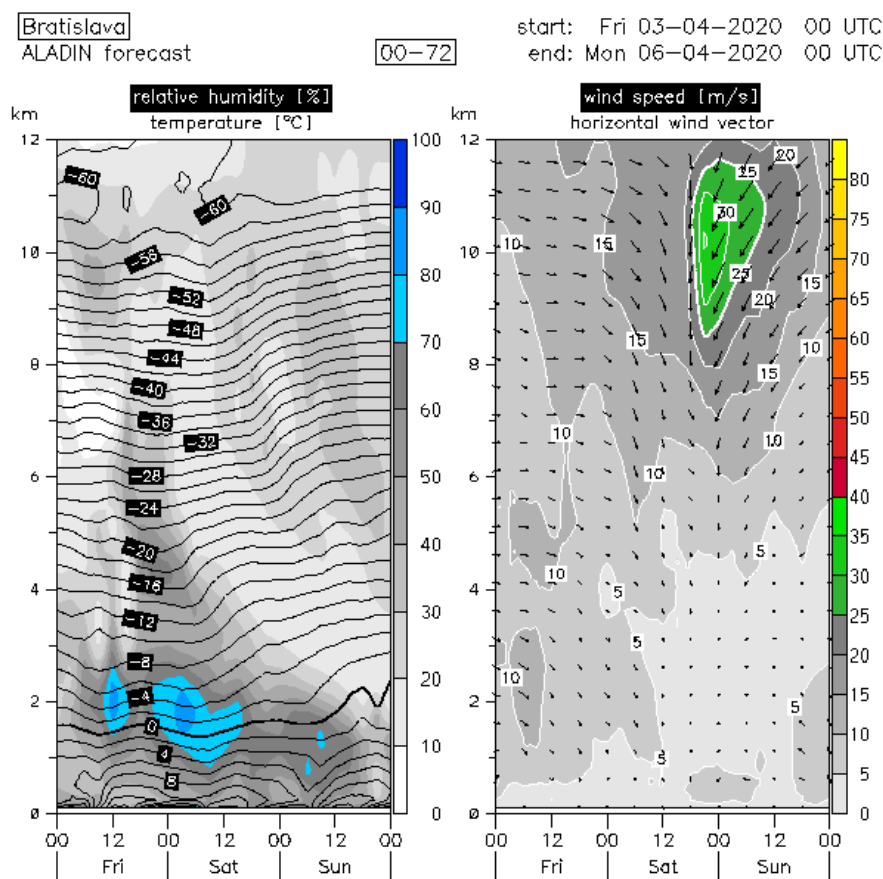
Následne sme navrhli vývojový diagram celého procesu leteckých prác, ktorý plní funkciu simulačnej schémy. Simulačnú schému sme riešili s využitím tradičnej metódy

CYCLONE, teda klasickou formou vývojového diagramu, a pre porovnanie tiež pomocou novej notácie *BPMN*.

4.3 Zostavenie vlastného simulačného modelu

Vlastný simulačný model je možné zostaviť pomocou viacerých, na trhu bežne dostupných, softvérov. Na Slovenskej technickej univerzite máme k dispozícii programovacie prostredie MATLAB, preto sme zvolili práve tento systém. Vzhľadom na charakter leteckých prác v stavebníctve, resp. stavebných procesov všeobecne, ide o simulačný model založený na princípoch diskretnej simulácie.

V dôsledku skutočnosti, že i väčšina vstupných dát má diskretný charakter, sme model navrhli priamo v prostredí MATLABu formou tzv. *live scriptu* (živého skriptu). Ten predstavuje priamy zápis algoritmu s využitím vlastného programovacieho jazyka prostredia MATLAB, avšak obohateného o interaktívne ovládacie prvky a interpretáciu výstupov algoritmu v reálnom čase. Navyše, zdrojový kód algoritmu je možné ľubovoľne členiť na sekcie, komentovať, či dopĺňať vysvetľujúcimi obrázkami a odkazmi, preto ide o spôsob, ktorý je mimoriadne vhodný aj z didaktického hľadiska.



Obr. 4.2: Model ALADIN - príklad výškového profilu teploty, relatívnej vlhkosti a rýchlosti vetra pre Bratislavu - predpoveď od 3.4.2020 do 6.4.2020, výška 0 - 12 km (autor)

Pri posúdení závažnosti a celkového vplyvu jednotlivých pôsobiacich faktorov na činnosť vrtuľníka sme vychádzali z poznatkov a skúseností leteckej praxe. V rámci riešenia simulačného modelu sme preto neuvažovali s faktormi, ktoré preukazujú nízku alebo zanedbateľnú mieru významnosti. Vstupné dáta so spojitým charakterom, teda najmä nomogram maximálnej vzletovej hmotnosti vrtuľníka, sme v potrebnom rozsahu diskretizovali do podoby trojrozmernej matice s konečným počtom hodnôt.

Kľúčovú časť simulačného modelu predstavuje meteorologické zabezpečenie vstupných dát. Túto časť sme navrhli na báze viacerých nadväzujúcich krokov s postupnou aproximáciou údajov pomocou rôznych numerických modelov predpovede počasia, ktoré poskytuje SHMÚ. Relevantná numerická predpoveď počasia je v ustálených podmienkach maximálne do 10 dní. Z toho dôvodu sme v tejto časti navrhli postup zložený z 2 krokov s plánovaním realizácie leteckých prác max. 10 dní pred požadovaným termínom.

V aktuálnej implementácii simulačného modelu neuvažujeme z dôvodu jeho zjednodušenia riešenie celej dráhy a profilu letu vrtuľníka, teda ani preletu vrtuľníka z domovského letiska na miesto výstavby, ale iba riešenie jedného dôležitého bodu, ktorý predstavuje práve miesto výstavby. Prvý krok navrhnutého algoritmu vychádza z modelu IFS a uplatní sa v intervale 10 až 3 dni pred plánovaným termínom prác. Z technického hľadiska môžeme v tomto kroku predpoveď aktualizovať každých 12 hodín, keďže vychádza zo spomenutého modelu IFS, a to v čase 00:00 a 12:00 UTC.

V druhom kroku, od 3 dní pred plánovanou akciou do jej očakávaného termínu, používame už lokálne modely s vyšším rozlíšením. Vďaka nim by sme mali potvrdiť predpokladaný charakter počasia a spresniť skutočný termín a trvanie realizácie. V tomto intervale už dokážeme naše rozhodnutie prehodnocovať každých 6 hodín, a to v čase 00:00, 06:00, 12:00 a 18:00 UTC, resp. v prípade použitia tzv. *rapid update* modelov každú 1 až 3 hodiny. Ukážka grafického výstupu modelu ALADIN, tzv. výškového profilu, so zobrazením jednotlivých parametrov pre hladiny 0 - 12 km nad zemským povrchom je na obr. 4.2.

Výstupy z predpovedného modelu ALADIN sme v spolupráci so SHMÚ upravili pre použitie v simulačnom modeli do formy dátového súboru s predpísaným formátom. Pre konkrétny bod rastra (miesto výstavby) sme tak získali diskretizované dáta v počítačovo spracovateľnej podobe. Aktuálny dátový súbor generuje SHMÚ v skôr uvedenom intervale, teda každých 6 hodín. Interpretácia novej predpovede a jej vplyv na stavebné práce sa takto stávajú iba záležitosťou nového spustenia simulačného modelu s príslušným dátovým súborom na vstupe.

Navrhnutý simulačný model umožňuje zvoliť miesto výstavby, požadovaný termín (čas) realizácie, typ vrtuľníka, resp. jeho nosnosť, priemernú preletovú rýchlosť, ľubovoľne určiť počet simulačných behov a zadať základné technologické parametre dopravovaných bremien (hmotnosti a dopravné vzdialenosti zo skládky na miesto určenia). Ďalšou okrajovou podmienkou je dĺžka pracovnej zmeny.

Výstupmi z modelu sú priemerné štatistické hodnoty z jednotlivých behov a tiež celkové hodnoty:

- priemerný čas trvania prác a štandardná odchýlka,
- priemerný čas trvania letového cyklu vrtuľníka a štandardná odchýlka,
- priemerný predpokladaný čas trvania nevykonaných prác pre lety, ktoré sa nemohli realizovať z dôvodu nevyhovujúceho počasia,
- výsledné priemerné trvanie prác v letových hodinách,
- výsledné priemerné predpokladané trvanie nevykonaných prác pre lety, ktoré sa nemohli realizovať z dôvodu nevyhovujúceho počasia,
- výsledné priemerné trvanie prác prepočítané na pracovné dni a analogický prepočet priemerného predpokladaného trvania nevykonaných prác.

Okrem numerickej podoby sú niektoré informácie prezentované aj v grafickej podobe, a to vo forme histogramu a krabicového grafu (*boxplot*). Úplný zdrojový kód algoritmu, zapísaný vo vlastnom programovacom jazyku prostredia MATLAB, je uvedený v prílohe č. 6.

4.4 Verifikácia simulačného modelu

Správnosť navrhnutého simulačného modelu preukazujeme jeho verifikáciou, a to na prípade výstavby kabínkovej lanovky U Kowalskiego - Hala Skrzyczneńska v Szczyrku (Poľsko), na ktorej sme 8. augusta 2017 vykonávali snímkovanie priebehu leteckých prác.

Vstupné údaje o bremenách, ich počte a hmotnosti sme prevzali z hmotnostnej tabuľky, poskytnutej výrobcom lanovky Leitner ropeways, ktorá sa v úplnosti nachádza v prílohe č. 3. Informácie o dĺžke dopravnej trasy pre každé bremeno sme získali z výkresu pozdĺžneho profilu trasy lanovky, ktorú rovnako poskytla spoločnosť Leitner. Dopravnú vzdialenosť bremena sme určili ako tzv. šikmú dĺžku medzi dolnou stanicou a realizovanou podperou. Celkovo dopravujeme 25 bremien.

Vzhľadom na to, že realizácia opisovanej stavby sa uskutočnila už v roku 2017, pre verifikáciu navrhnutého modelu nemôžeme použiť dáta z numerických modelov predpovede počasia. Takýto postup by tiež bol v rozpore s filozofiou verifikácie simulačných modelov. V spolupráci so SHMÚ sme preto získali historické meteorologické dáta z najbližšej meteorologickej stanice v meste Bielsko-Biala zo dňa 8. augusta 2017.

Výsledky simulácie sú v súlade s očakávaniami a potvrdzujú logickú a vecnú správnosť navrhnutého simulačného modelu. Verifikácia preukázala, že poskytnuté výstupy sú v súlade s realitou pri realizácii podobných typov stavieb a simulačný model je možné prakticky používať.

4.5 Prípadová štúdia

Cieľom tejto podkapitoly je predstaviť možnosti praktického využitia simulačného modelu, a to na príklade stavby lanovej dráhy Bachledova dolina - Malá Poľana v Belianskych Tatrách (okres Poprad). Z technického hľadiska ide o zhodný typ lanovky ako v predchádzajúcom prípade, teda jednolanovú kabínkovú lanovku s obežným systémom typu GD10 od výrobcu

Leitner ropeways. Výstavba tejto lanovky sa uskutočnila v roku 2018. Informácie o poveternostných podmienkach v predpokladanom čase výstavby získavame v zmysle už uvedenej koncepcie. Pri simulácii používame 72-hodinovú (3-dňovú) numerickú predpoveď počasia podľa modelu ALADIN SHMÚ z 13.4.2020 06:00 SELČ.

Vo variante 1 naplánujeme začiatok montáže v čase 50 hodín od začiatku platnosti použitej predpovede, teda na 15.4.2020 08:00 SELČ. Predpokladáme štandardnú dopravnú rýchlosť vrtuľníka približne 15 km/h a trvanie pracovnej zmeny 8 hodín. Spolu vykonáme 150 simulačných behov, teda simulácia navrhovaného montážneho procesu prebehne 150-krát. Úplný výpis výstupu (priebehu simulácie) zo simulačného modelu sa nachádza v prílohe č. 8. Výsledky simulácie uvádza tab. 4.1.

Tab. 4.1: Výsledky simulácie pre variant 1

Trvanie prác	Priemerný čas	[min]	229,37
	Minimum a maximum	[min]	218,32 - 242,08
	Štandardná odchýlka	[min]	4,49
Trvanie letového cyklu	Priemerný čas	[min]	11,47
	Minimum a maximum	[min]	10,92 - 12,10
	Štandardná odchýlka	[min]	0,22
Trvanie nevykonaných prác	Priemerný čas	[min]	-
Výsledné hodnoty	Priemerné trvanie prác	[h]	3,82
		pracovné dni	0,48
	Priemerné trvanie nevykonaných prác	[h]	-
		pracovné dni	-

Vo variante 2 predpokladáme začiatok montáže v čase 10 hodín od začiatku platnosti použitej predpovede, teda 13.4.2020 16:00 SELČ. Z praktického hľadiska je začiatok prác v takto neskorých popoludňajších hodinách vysoko nepravdepodobný, a to aj napriek značnej dĺžke denného svitu v apríli (západ slnka v Poprade nastane v daný deň v čase 19:27 SELČ). Cieľom tohto variantu je teda poukázať na praktické dopady rôznych kombinácií vstupných hodnôt vzhľadom na predpoveď počasia, ktorú sme mali ako aktuálnu k dispozícii v čase spracovania riešenia dizertačnej práce.

Rovnako ako vo variante 1 predpokladáme štandardnú dopravnú rýchlosť vrtuľníka približne 15 km/h a trvanie pracovnej zmeny 8 hodín. Opäť vykonáme 150 simulačných behov, teda simulácia navrhovaného montážneho procesu prebehne 150-krát. Úplný výpis výstupu (priebehu simulácie) zo simulačného modelu sa nachádza v prílohe č. 9. Výsledky simulácie uvádza tab. 4.2.

Tab. 4.2: Výsledky simulácie pre variant 2

Trvanie prác	Priemerný čas	[min]	155,33
	Minimum a maximum	[min]	145,97 - 166,16
	Štandardná odchýlka	[min]	3,85
Trvanie letového cyklu	Priemerný čas	[min]	10,36
	Minimum a maximum	[min]	9,73 - 11,08
	Štandardná odchýlka	[min]	0,26
Trvanie nevykonaných prác	Priemerný čas	[min]	73,40
Výsledné hodnoty	Priemerné trvanie prác	[h]	2,59
		pracovné dni	0,32
	Priemerné trvanie nevykonaných prác	[h]	1,22
		pracovné dni	0,15

Výsledné hodnoty oboch variantov stavebného procesu sa zásadne líšia predovšetkým časom trvania nevykonaných prác (0 min verus 73,40 min), čo je spôsobené najmä meniacimi sa poveternostnými podmienkami na stavenisku. Výsledky získané simuláciou považujeme za vierohodné, pretože sa veľmi približujú k tým, ktoré bývajú dosahované v praxi v prípade realizácií stavieb tohto typu a rovnako v plnom rozsahu odôvodňujú použitie simulácie pri príprave leteckých prác v stavebníctve.

4.6 Vyhodnotenie výsledkov - čiastkový záver

V kap. 2.2 sme formulovali niekoľko hypotéz, ktorých platnosť sme preverovali v jednotlivých krokoch riešenia dizertačnej práce. K jednotlivým hypotézam uvádzame:

Hypotéza č. 1: *Poveternostné podmienky ovplyvňujú schopnosť letu vrtuľníka a jeho skutočnú maximálnu nosnosť, čo má zásadný vplyv na časový plán výstavby a organizáciu práce a normatívy spotreby času a práce.*

Hypotéza sa potvrdila (kap. 4.5), o čom svedčia predovšetkým rozdielne hodnoty maximálnej nosnosti vrtuľníka pri rozličných poveternostných podmienkach, teda v jednotlivých variantných riešeniach procesu.

Hypotéza č. 2: *Nosnosť vrtuľníka ovplyvňuje výslednú cenu, čas i kvalitu prác a tým aj pravdepodobnosť splnenia požadovaných kritérií.*

Hypotéza sa potvrdila (kap. 4.5), dôkazom sú výsledné intervaly času trvania prác vykazujúce rozptyl v desiatkach minút (218,32 - 242,08 min pre variant 1, 145,97 - 166,16 min pre variant 2). Z nich vyplýva rozdielna cena prác, a to vzhľadom na skutočnosť, že letecké práce sa obvykle fakturujú na základe ceny za letovú hodinu. Rozdielna kvalita prác sa prejavuje „abstraktne“, a to predovšetkým v schopnosti, príp. neschopnosti splniť všetky

práce v požadovanom čase, čo má dopady na celkovú organizáciu procesu. Napr. vo variante 2 nebolo možné realizovať v daný deň všetky plánované práce v dôsledku nevhodných poveternostných podmienok.

Hypotéza č. 3: *Deterministický prístup nie je schopný zohľadniť všetky rozhodujúce faktory, z čoho vyplývajú nepresnosti v časovom a finančnom plánovaní.*

Hypotéza sa potvrdila čiastočne (kap. 4.5), v rozsahu spracovania simulačného modelu. Napríklad, ak by sme pri variante 1 uvažovali s priemerným časom trvania prác, teda s deterministickou hodnotou 229,37 min, dôjde k skresleniu časového, ale najmä finančného plánu, a teda k jeho poddimenzovaniu alebo naopak predimenzovaniu (pozri aj hypotézu č. 2). V prípade realizácie náročnejších a komplexnejších procesov sa budú tieto rozdiely zväčšovať.

Hypotéza č. 4: *Simulačné modelovanie umožňuje priblížiť sa stavebnej realite viac ako tradičné deterministické koncepcie.*

Hypotéza sa potvrdila čiastočne, v rozsahu spracovania simulačného modelu (pozri aj hypotézu č. 3). Simulačný model leteckých prác znázornil ich premenlivosť a závislosť na vonkajších vplyvoch adekvátne a v plnom súlade s očakávaniami. Dosahované výsledky sú v súlade aj s výstupnými hodnotami leteckých prác uskutočnených podobnou technológiou v dávnejšej minulosti (kap. 4.4).

Hypotéza č. 5: *Modelovanie práce vrtuľníkov môže priniesť potrebu vývoja nových prvkov, systémov a technológií, ktoré zrýchlia a zjednodušia prácu vrtuľníkov a znížia jej ovplyvniteľnosť meniacimi sa podmienkami počas výstavby.*

Hypotéza sa potvrdila, uvedené prvky, systémy a technológie však už v prevažnej väčšine prípadov existujú. Ich existencia môže mať praktický charakter (použitie montážnych prípravkov) alebo môžu existovať v koncepcnej rovine, čo v praxi býva prípad receptúry betónov. Tieto receptúry sa môžu upravovať („finalizovať“) pre podmienky konkrétnej stavby, preto sme pristúpili k zhotoveniu skúšobnej zámesi čerstvého betónu s požadovanými parametrami, predovšetkým s predĺženým časom spracovateľnosti (osobitná podkapitola dizertačnej práce).

5 DISKUSIA

V prezentovanej prípadovej štúdii, ale aj pri verifikácii modelu, sme sa zamerali na riešenie výstavby traťových podpier lanových dráh, teda na montážny proces. Toto zameranie vyplynulo jednak z dostupných možnosti snímkovania skutočných projektov v potrebnom časovom horizonte a na druhej strane z dostupnosti potrebných podkladov, ktoré mal autor k dispozícii vzhľadom na svoje odborné zázemie. Prezentovaná problematika je značne rozsiahla, preto autor tieto príklady vníma viac ako náznaky, ktoré ukazujú cestu k možnému využitiu ako simulačných modelov, tak aj numerických modelov predpovede počasia dnešnej úrovne pri príprave ľubovoľných typov stavieb.

Návrh simulačného modelu aj jeho realizácia prebehli v zmysle čo najväčšej budúcej flexibility, preto model umožňuje použitie pri ktoromkoľvek type stavby vrátane dôležitých betonárskych procesov. Simulácia betonárskeho procesu by sa uskutočnila analogicky ako pri montážnom procese, a to v zásade s iba jediným rozdielom: vstupné hmotnosti bremien musia byť uvedené tak, aby zohľadnili hmotnosť koša na betón spolu s hmotnosťou samotného čerstvého betónu v koši. V tomto prípade je vhodné model doplniť napr. aj o priebežné sledovanie dĺžky pobytu autodomiešavača s čerstvým betónom na stavbe a následné upozornenie v prípade, keď celkový čas spracovávania čerstvého betónu na stavbe prekročí jeho povolený čas spracovateľnosti.

Simulačný model je možné v budúcnosti ďalej rozšíriť a spresniť. Ako zaujímavá myšlienka sa javí zohľadnenie 3 dôležitých bodov počas letu vrtuľníka namiesto jedného, a to s ohľadom na predpokladané poveternostné podmienky. Týmito bodmi sú domovské letisko vrtuľníka, štartovacia plocha vrtuľníka v teréne a samotné miesto realizácie stavby. S využitím súčasných možností numerických modelov predpovede počasia je možné pozornosť zamerať aj na riešenie celej dráhy a výškového profilu letu vrtuľníka, a to pri prelete na stavenisko aj počas samotnej výstavby.

V súvislosti s použitou koncepciou simulačného modelu, založenou na rôznych druhoch numerických modelov predpovede počasia, je v neposlednom rade vhodné poznamenať, že aj v prípade takto navrhnutého plnoautomatického rozhodovacieho systému (modelu) je z praktického hľadiska vhodné posledných 48, resp. 24 hodín pred samotnou realizáciou konzultovať plán prác s profesionálnou meteorologickou službou. V podmienkach Slovenskej republiky je teda vhodné osloviť SHMÚ, ktorý sa aktuálnemu počasiu venuje 24 hodín denne.

6 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

6.1 Prínosy dizertačnej práce pre vedu

Dizertačná práca rozširuje poznanie vo vednom odbore technológia stavieb o viacero nových skutočností. Predovšetkým ide o samotný simulačný model leteckých prác, jeho funkčnosť, verifikáciu a metodiku práce s modelom. Ďalším prínosom je laboratórne overená receptúra čerstvého betónu, ktorú je možné využiť pri príprave realizácie betonárskych procesov pomocou vrtuľníkov. Medziodborový charakter práce súčasne prispieva k rozšíreniu poznania aj za hranice stavebníctva, najmä v oblasti numerickej predpovede počasia (poznatky z praktickej aplikácie modelov SHMÚ a metodika práce s modelmi) a v oblasti priemyselnej logistiky (poznatky z aplikácie simulačného modelovania v stavebnej výrobe).

6.2 Prínosy dizertačnej práce pre pedagogiku

Medzi prínosy dizertačnej práce z hľadiska pedagogiky patrí primárne inovácia výučbového procesu so širším zapojením výpočtovej techniky, a to prostredníctvom overenia vhodnosti využitia simulačných metód pri príprave náročných stavieb. Z praktického hľadiska ide o overenie vhodnosti programovacieho prostredia MATLAB pre výučbu simulácie

v podmienkach študijného odboru stavebníctvo, pričom daný softvér je v podmienkach STU v Bratislave k dispozícii bezplatne pre každého študenta aj zamestnanca. Pre pedagogický proces môžu byť prínosné aj všeobecné poznatky o možnostiach využitia vrtuľníkov v stavebníctve, o ich výhodách a špecifikách pri týchto prácach a v neposlednom rade i poznatky o štandarde BPMN.

6.3 Prínosy dizertačnej práce pre prax

Navrhnutý simulačný model leteckých prác môže (aj po prípadnom doplnení či spresnení) predstavovať vhodnú pomôcku pre stavebnú prax pri príprave realizácie uvedených typov stavieb a zvýšení ich efektivity. Vo všeobecnej rovine môžu byť pre prax prínosné poznatky o výhodách, možnostiach a špecifikách simulačných metód v podmienkach stavebnej produkcie, detailný prehľad o minulosti a súčasnosti leteckých prác na našom, prípadne bývalom československom území a o realizovaných dielach a súvisiacich skutočnostiach. Dizertačná práca tiež odbornú verejnosť oboznamuje s možnosťami súčasnej numerickej meteorológie a poukazuje na potrebu návrhu receptúry čerstvého betónu vhodnej pre použitie pri betonárskych procesoch s využitím vrtuľníkov.

7 ZÁVER

V predloženej dizertačnej práci sme sa zaoberali koncepciou, návrhom a implementáciou simulačného modelu leteckých prác, ktorý vnímame v širšom edukatívnom rámci so zameraním sa na možnosti využitia počítačovej simulácie pri príprave realizácie tohto typu stavieb. Podstatnou charakteristikou navrhnutého simulačného modelu je riešenie vplyvu poveternostných podmienok na realizáciu výstavby, ktorého algoritmus sme navrhli na báze rôznych komerčne používaných numerických modelov predpovede počasia, ako sú modely IFS, ALADIN a A-LAEF.

Na základe poznatkov získaných snímkaním reálnych procesov, ako aj na základe relevantných informácií zo stavebnej praxe, sme navrhli a zostavili simulačný model leteckých prác a jeho možnosti preukázali na prípade výstavby kabínkovej lanovej dráhy v Bachledovej doline (okres Poprad). Súčasne sme prezentovali široké možnosti uplatnenia numerických modelov predpovede počasia súčasnej úrovne, ktoré, ako také, predstavujú de facto „simulačný model v simulačnom modeli“.

ZOZNAM VYBRANEJ POUŽITEJ LITERATÚRY

1. ABOURIZK, S., HALPIN, D., MOHAMED, Y., HERMANN, U., 2011. Research in Modeling and Simulation for Improving Construction Engineering Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(10), s. 843-852. ISSN 0733-9364.
2. ALSUDAIRI, A.A., 2015. Simulation as a Tool for Assessing the Economical Aspects of Construction Processes. *Procedia Engineering*, 118, s. 1086-1095. ISSN 1877-7058.
3. BELLUŠ, M. et al., 2019. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational – Limited Area Ensemble Forecasting (ALADIN-LAEF). *Advances in*

- Science and Research: Contributions in Applied Meteorology and Climatology*, 16, s. 63-68. ISSN 1992-0628.
4. DERKOVÁ, M. et al., 2017. Recent improvements in the ALADIN/SHMU operational system. *Meteorological Journal*, 20(2), s. 45-52. ISSN 1335-339X.
 5. DÚ (Dopravný úrad), 2020. *Letecké práce* [online]. Bratislava: Dopravný úrad [cit. 11. mája 2020]. Dostupné na internete: <http://letectvo.nsat.sk/letova-prevadzka/osvedcenie-letovej-sposobilosti/formulare/>
 6. HRUBEŠ, V., 1988. Využití vrtulníků v osmdesátých letech v ČSSR. In: *Využitie vrtulníkov v národnom hospodárstve - zborník prednášok, Tatranská Lomnica, 18. - 19.10.1988*. Žilina: Dom techniky ČSVTS v Žiline, s. 16-19.
 7. HULÍNOVÁ, Z., 2011. *Analýza stavebných procesov z hľadiska ich modelovania*. Bratislava: Nakladateľstvo STU. ISBN 978-80-227-3474-5.
 8. JINDRA, F., 1965. *Stavebně montážní práce s využitím vrtulníků v ČSSR*. Praha: NADAS.
 9. JUNG, M., PARK, M., LEE, H.-S., KIM, H., 2016. Weather-delay simulation model based on vertical weather profile for high-rise building construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(6). ISSN 0733-9364.
 10. LEE, H.-S., SHIN, J.-W., PARK, M., RYU, H.-G., 2009. Probabilistic duration estimation model for high-rise structural work. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(12), s. 1289-1298. ISSN 0733-9364.
 11. LINDHARD, SØ.M. et al., 2019. Impact of Activity Sequencing on Reducing Variability. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(3). ISSN 0733-9364.
 12. LIU, D. et al., 2015. Schedule Risk Analysis for TBM Tunneling Based on Adaptive CYCLONE Simulation in a Geologic Uncertainty-Aware Context. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(6). ISSN 0887-3801.
 13. MAHMOODZADEH, A., ZARE, S., 2016. Probabilistic prediction of expected ground condition and construction time and costs in road tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), s. 734-745. ISSN 1674-7755.
 14. MESSINGEROVÁ, V., 2005. *Technológia vzdušnej dopravy dreva v lesníctve*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. ISBN 80-228-1523-3.
 15. MUHABIE, T.Y. et al., 2018. A discrete-event simulation approach to evaluate the effect of stochastic parameters on offshore wind farms assembly strategies. *Ocean Engineering*, 149, s. 279-290. ISSN 0029-8018.
 16. SONG, L., ELDIN, N.N., 2012. Adaptive Real-Time Tracking and Simulation of Heavy Construction Operations for Look-Ahead Scheduling. *Automation in Construction*, 27, s. 32-39. ISSN 0926-5805.
 17. TERMONIA, P. et al., 2018. The ALADIN system and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development*, 11(1), s. 257-281. ISSN 1991-9603.

18. WANG, Y. et al., 2018. 27 years of regional cooperation for limited area modelling in central Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(7), s. 1415-1432. ISSN 1520-0477.

ZOZNAM VYBRANÝCH PUBLIKOVANÝCH PRÁC AUTORA

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 **BISTÁK, Andrej** [50 %] - HULÍNOVÁ, Zdenka [50 %]. Modelovanie stavebných procesov realizovaných vrtuľníkmi. In *Konstrukce*. Roč. 15, č. 4 (2016), s. 35-38. ISSN 1213-8762 (print).

ADE02 **BISTÁK, Andrej** [50 %] - HULÍNOVÁ, Zdenka [50 %]. Simulačné modelovanie a jeho využitie pri príprave stavebných procesov realizovaných vrtuľníkmi. In *Czech Journal of Civil Engineering [elektronický zdroj]*. Vol. 3, iss. 2 (2017), online, s. 15-21. ISSN 2336-7148.

ADE03 **BISTÁK, Andrej** [50 %] - HULÍNOVÁ, Zdenka [50 %]. Proposal of a simulation model of aerial works from the point of view of construction technology. In *Czech Journal of Civil Engineering [elektronický zdroj]*. Vol. 4, iss. 2 (2018), online, s. 20-27. ISSN 2336-7148.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 **BISTÁK, Andrej** [50 %] - HULÍNOVÁ, Zdenka [50 %]. Stavebno-technologická príprava leteckých prác s využitím simulačného modelovania. In *MMK 2016. 7. Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky [elektronický zdroj] : recenzovaný sborník příspěvků mezinárodní vědecké konference, 12. - 16. prosince 2016, Hradec Králové, Česká republika*. 1. vyd. Hradec Králové : Magnanimitas, 2016, online, s. 1732-1739. ISBN 978-80-87952-17-7.

AFC02 **BISTÁK, Andrej** [50 %] - HULÍNOVÁ, Zdenka [50 %]. Simulation modeling and its use in construction-technological preparation for aerial works. In *CER Comparative European Research 2018 [elektronický zdroj] : proceedings. March 28-30, 2018, London, UK*. 1. vyd. London : Sciemcee Publishing, 2018, online, s. 90-94. ISBN 978-0-9935191-7-8.

AFC03 **BISTÁK, Andrej** [45 %] - HULÍNOVÁ, Zdenka [45 %] - NEŠTIAK, Michal [5 %] - GAŠPARÍK, Jozef [5 %]. The use of computer simulation in preparation of construction works carried out by helicopters. In *4th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium - WMCAUS 2019 [elektronický zdroj] : proceedings. 17-21 June 2019, Prague, Czech Republic*. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2019, online, [9] s., art. no. 032037. ISSN 1757-8981. **V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85072951623 ; DOI: 10.1088/1757-899X/603/3/032037.**

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 **BISTÁK, Andrej** [100 %]. Vrtuľníky a ich úloha v technológii stavieb. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 26th Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics*. 26. October 2016, Bratislava. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, CD-ROM, s. 255-260. ISBN 978-80-227-4645-8.

AFD02 **BISTÁK, Andrej** [100 %]. Simulácia stavebných procesov realizovaných vrtuľníkmi: analýza a návrh koncepcie modelu. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 27th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Geodesy and Cartography, Landscaping, Building Technology, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Theory and Environmental Technology of Buildings, Water Resources Engineering*. 25. October 2017, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, s. 226-231. ISBN 978-80-227-4751-6.

AFD03 **BISTÁK, Andrej** [100 %]. Využitie simulačného modelovania pri príprave výstavbového procesu realizovaného technológiou leteckých prác. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering*. October 24th 2018, Bratislava. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, CD-ROM, s. 115-122. ISBN 978-80-227-4864-3.

AFD04 **BISTÁK, Andrej** [50 %] - **HULÍNOVÁ, Zdenka** [50 %]. Construction of ropeways in Slovakia in terms of pre-construction design using helicopters (case study). In *Research, Production and Use of Steel Ropes, Conveyors and Hoisting Machines (VVA POL 2018) [elektronický zdroj] : proceedings. 18th - 21st September 2018, High Tatras - Podbanské, Slovakia*. 1. vyd. London : EDP Sciences, 2019, online, [8] s., art. no. 01002. ISBN 2261-236X. V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/201926301002.

AFD05 **BISTÁK, Andrej** [45 %] - **HULÍNOVÁ, Zdenka** [45 %] - **NEŠTIAK, Michal** [10 %]. Simulačný prístup a jeho využitie v procese stavebno-technologickej prípravy leteckých prác. In *CTM 2019 - Construction Technology and Management [elektronický zdroj] : proceedings of the International Scientific Conference. December 12-13, 2019 Kočovce, Slovakia*. 1. vyd. Brno : Tribun EU, 2019, CD-ROM, s. 19-26. ISBN 978-80-263-1549-0.

AFD06 HULÍNOVÁ, Zdenka [55 %] - FUNTÍK, Tomáš [5 %] - HULINOVÁ, Jana [Madová, Jana] [20 %] - **BISTÁK, Andrej** [20 %]. Effectiveness of costs incurred for labor protection. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II : proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. High Tatras Mountains, Tatranské Matliare, Slovak Republic, 29 June - 1 July 2016*. 1. vyd. London : Taylor & Francis Group, 2017, S. 425-431. ISBN 978-1-138-03224-8. **V databáze: SCOPUS.**

BDE Odborné práce v ostatných zahraničných časopisoch

BDE01 **BISTÁK, Andrej** [100 %]. Vrtulníky ve stavebním průmyslu bývalého Československa. In *Realizace staveb*. Roč. 12, č. 4 (2017), s. 44-45. ISSN 1802-0631.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

BDF01 **BISTÁK, Andrej** [100 %]. Desať rokov obnovenej prevádzky lanovky na Kamzíku. In *LAVEX info*. Roč. 42, č. 2 (2015), s. 5-6. ISSN 1336-1953.

BDF02 **BISTÁK, Andrej** [50 %] - HULÍNOVÁ, Zdenka [50 %]. Využitie vrtuľníkov pri realizácii stavieb. In *Eurostav*. Roč. 22, č. 3 (2016), s. 40-42. ISSN 1335-1249.

BDF03 **BISTÁK, Andrej** [100 %]. Vrtuľníky a prvopočiatky ich využitia pri výstavbe lanových dráh na Slovensku. In *LAVEX info*. Roč. 43, č. 2 (2016), s. 19-20. ISSN 1336-1953.