



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Stavebná Fakulta

Ing. Eva Mišovychová

Autoreferát dizertačnej práce
Navrhovanie a dimenzovanie veľkoplošných suterénov z hľadiska
tepelnej ochrany

na získanie akademického titulu *philosophiae doctor, PhD.*

v doktorandskom študijnom programe:

3631 Teória a konštrukcie pozemných stavieb

v študijnom odbore: Stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Bratislava 2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

Predkladateľ: **Ing. Eva Mišovýchová**

Katedra konštrukcií pozemných stavieb

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Rastislav Ingeli, PhD.**

Katedra konštrukcií pozemných stavieb

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o h

na Katedre konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Prehľad súčasného stavu problematiky.....	6
2.1.	Kvalita vnútorného prostredia v podzemnom parkovisku	6
2.1.1.	Teplota zeminy	6
2.1.2.	Štúdie kvality vnútorného prostredia v podzemných podlažiach.....	7
2.1.3.	Tepelný zisk od áut.....	8
2.2.	Dynamické simulácie v softvéri DesignBuilder.....	9
2.2.1.	Modelovanie prenosu tepla zeminou, vonkajším prostredím a budovou.....	9
2.3.	CFD simulácia v softvéri Flovent	10
2.3.1.	Turbulentné prúdenie	10
2.3.2.	Štúdie s využitím CFD simulácie	11
3	Tézy dizertačnej práce.....	12
3.1.	Predmet riešenia dizertačnej práce.....	12
3.2.	Ciele dizertačnej práce	12
3.3.	Metódy spracovania dizertačnej práce	12
4	Analýza veľkoplošných suterény z hľadiska tepelnej ochrany	13
4.1.	Meranie in situ.....	13
4.2.	Dynamická simulácia	15
4.2.1.	Geometria	15
4.2.2.	Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií	15
4.2.3.	Vetranie	16
4.2.4.	Teplota zeminy	16
4.2.5.	Klimatické dáta.....	16
4.2.6.	Teploty okolitých priestorov	17
4.2.7.	Režim otvárania a zatvárania brán	18
4.2.8.	Tepelné zisky od áut.....	18
4.2.9.	Výsledky.....	19
4.3.	Dynamická simulácia pre alternatívy prevádzkových stavov	21
4.3.1.	Geometria	21
4.3.2.	Vetranie	22
4.3.3.	Výsledky.....	23
4.4.	CFD simulácia.....	24

4.4.1. Geometria	24
4.4.2. Teplota okolitých priestorov	24
4.4.3. Vetrание	24
4.4.4. Emisie oxidu uhoľnatého (CO)	26
4.4.5. Teplota zeminy	26
4.4.6. Tepelné zisky od áut.....	27
4.4.7. Tvorba siete	27
4.4.8. Výsledky.....	28
4.5. Tepelná izolácia stropu nad nevykurovaným priestorom	31
Záver	32
Prínos pre vedu a prax.....	33
Literatúra.....	34
Publikačná činnosť autora	38

1 Úvod

Podzemné budovy predstavujú alternatívu k nadzemným budovám z hľadiska celkovej energetickej náročnosti a ďalších aspektov funkcie budov. Predmetom riešenia dizertačnej práce je optimalizácia návrhu veľkoplošných podzemných podlaží, ktoré sa využívajú ako parkoviská z hľadiska tepelnej ochrany budov. Vnútna teplota nevykurovaných priestorov je v súčasných platných normách uvažovaná všeobecne (staticky) a to nemusí platiť pre rôzne konštrukčne, geometrické a technické riešenia veľkoplošných podzemných podlaží.

Existuje viacero postupov a možnosti modelovania na stanovenie tepelných strát vykurovaných priestorov cez nevykurované priestory veľkoplošných podzemných podlaží. Je potrebné preveriť a overiť možnosti simulačných nástrojov na stanovenie vhodných metód tepelných strát pre dané veľkoplošné suterény. Na výslednú teplotu vzduchu takýchto podzemných priestorov vplýva veľa faktorov. Ide hlavne o geometriu, konštrukčné riešenie, riešenie vetrania a VZT systémov, tepelnotechnické vlastnosti plášťa, tepelnotechnické vlastnosti zeminy, tepelné zisky od áut a iné.

Produkcia tepla od rôznych typov vozidiel (napr. sedany, SUV, elektromobily) závisí od ich veľkosti, typu motora, konštrukcie a jazdných podmienok. Dĺžka parkovania vozidla ovplyvňuje celkový tepelný zisk, pretože vozidlo po vypnutí naďalej vydáva teplo. Teplota okolia, vlhkosť a prúdenie vzduchu v podzemnom parkovisku môžu ovplyvniť spôsob, akým sa teplo odvádza. Pohyb vozidiel môže ovplyvniť prúdenie vzduchu a potenciálne prerozdeliť teplo v rámci parkovacej plochy. Primerané vetranie môže pomôcť regulovať teplotu tým, že vpustí chladnejší vzduch a odvedie teplý vzduch^[5]. Inštalácia snímačov teploty môže pomôcť zhromažďovať údaje v priebehu času, aby bolo možné účinne analyzovať tepelný režim. Pochopenie tepelných ziskov môže poskytnúť informácie o stratégiách energetického manažmentu a pomôcť optimalizovať vykurovacie systémy v zime. Udržiavanie tepelného komfortu na parkoviskách je dôležité pre pohodlie a bezpečnosť používateľov, najmä v chladnejších klimatických podmienkach^[6]. Analýza týchto parametrov môže poskytnúť základ pre pochopenie tepelnej dynamiky podzemných parkovísk a pomôcť pri presnejších výpočtoch.

Kvalitu vnútorného prostredia v podzemných parkoviskách zabezpečuje buď prirodzené vetranie, mechanické vetranie alebo ich kombinácia prirodzený prívod a odvod pomocou ventilátora. Nedostatočná výmena vzduchu podmieňuje značnú expozíciu vysokým úrovniam znečisťujúcich látok z emisií automobilov a mohla by spôsobiť zdravotné problémy (napríklad nevoľnosť, bolesti hlavy, zmätenosť, bolesť na hrudi a dokonca smrť) pre ľudí vo vnútri parkovacieho objektu^[7]. Hlavným zdrojom znečisťujúcich látok je oxid uhoľnatý (CO), a preto sa koncentrácia CO používa na overenie návrhu vetrania parkoviska^[8].

2 Prehľad súčasného stavu problematiky

2.1. Kvalita vnútorného prostredia v podzemnom parkovisku

Zabezpečenie kvalitného vnútorného vzduchu v podzemných parkoviskách je nevyhnutné pre ochranu zdravia a pohodlie všetkých používateľov. Sledovanými faktormi sú koncentrácia oxidu uhoľnatého CO a teplota vnútorného vzduchu. Oxid uhoľnatý je bezfarebný plyn bez chuti a zápachu, je ľahší ako vzduch, nedráždivý. Vzniká ako produkt nedokonalého spaľovania fosílnych palív či biomasy. Oxid uhoľnatý je jedovatý a otrava ním sa prejavuje najčastejšie bolesťami hlavy, závratmi, hučaním v ušiach, sčervenaním v tvári, bolesťami končatín, búšením srdca.

Hodnoty aké dosahuje teplota vnútorného vzduchu v podzemnom parkovisku v zimnom období sú dôležitý parameter pri návrhu hrúbky tepelnej izolácie stropu nad nevykurovaným priestorom. Zároveň je potrebné zabezpečiť prijateľnú teplotu vnútorného vzduchu pre používateľov týchto priestorov a zamestnancov správy budovy. Na teplotu vnútorného vzduchu majú vplyv rôzne faktory ako vlastnosti zeminy, hladina spodnej vody, teplota zeminy, vetranie atď.

2.1.1. Teplota zeminy

Vzťah medzi teplotou pôdy a teplotou vonkajšieho vzduchu je zložitý a ovplyvňujú ho rôzne faktory vrátane slnečného žiarenia, vlastností pôdy a sezónnych zmien. V lete teplo z atmosféry prúdi do zeme. Je to spôsobené vyššími teplotami vzduchu v porovnaní s chladnejšími teplotami podpovrchových vrstiev. Naopak, v zime teplo prúdi zo zeme do atmosféry, pretože zem lepšie zadržiava teplo ako chladnejší vzduch nad ňou.

Rusnák a kol.^[27] dokumentuje, že teplota pôdy by sa v nenarušenej pôde zvyšovala s hĺbkou približne na 10 °C. Teplota pôdy je ovplyvnená denným a ročným kolísaním teploty len do určitej hĺbky. Najväčšie kolísanie teploty je na zemskom povrchu, a to práve vplyvom slnečného žiarenia. Denné kolísanie teploty pôdy sa pozoruje do hĺbky približne 1 m. Ročné kolísanie teploty ovplyvňuje teplotný režim pôdy v závislosti od tepla akumulovaného pôdou v letnom období, v klimatických podmienkach Slovenska do hĺbky 15 m.

Larwa a kol.^[28] porovnali experimentálne a vypočítané výsledky a dospeli k záveru, že Carslawova-Jaegerova rovnica správne opisuje zmeny teploty pôdy. Hĺbková teplota pôdy sa ustálila na hodnote 10,8 °C. Teplota pôdy však závisí od mnohých faktorov: zemepisnej šírky, nadmorskej výšky, poveternostných podmienok, ročného obdobia, terénu, zatienenia, prítomnosti budov v okolí, typu pokrytia povrchu, vlastností pôdy. Teplota pôdy sa nedá presne predpovedať na žiadnom mieste ani v žiadnom čase, pretože niektoré z týchto veličín sa nepravidelne menia.

Na základe meraní v štúdiách, ktoré uskutočnili Nawalany a kol.^[29], vyplýva, že budovy ovplyvňujú teplotu pôdy v rozsahu 1,2 - 3,3 m.

2.1.2. Štúdie kvality vnútorného prostredia v podzemných podlažiach

Ho a kol.^[32] sa v štúdií zamerali na meranie koncentrácie CO a teploty v podzemnom parkovisku s cieľom pochopiť vplyv prevádzky vozidiel na vnútorné prostredie. Koncentrácia CO bola vyššia počas víkendov kvôli zvýšenej premávke a v oblastiach so slabým vetraním. Trend koncentrácie CO sa zhodoval s podielom prevádzkového času motora, čo naznačuje, že chod motora je kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim kvalitu ovzdušia. Teplota bola najvyššia na konci parkoviska a najnižšia pri vchode, čo zdôrazňuje vplyv tepla generovaného vozidlami. Na rozdiel od CO, teplo sa uvoľňuje z vozidiel aj po vypnutí motora, čo prispieva k zložitejšiemu prenosu tepla v parkovacom priestore. Tepelná kapacita stien a podlahy parkoviska tlmí extrémne výkyvy teploty. Štúdia zistila kvadratický vzťah medzi koncentráciou CO a objemom dopravy. Historický efekt (predchádzajúce úrovne CO a teploty) sa ukázal byť dôležitým faktorom pri predpovedaní súčasnej koncentrácie CO a teploty. Výsledky štúdie poskytujú kvantitatívne údaje pre modelovanie a validáciu podmienok v podzemných parkoviskách a sú užitočné pre projektantov ventilačných systémov.

Zhao a kol.^[33] hodnotili sezónne zmeny oxidu uhoľnatého CO na prirodzene vetranom podzemnom rezidenčnom parkovisku počas 1 roka nepretržitých terénnych meraní. Na základe nameraných údajov boli stanovené vplyvy dopravného prúdu a rýchlosti výmeny vzduchu na koncentráciu oxidu uhoľnatého. Z korelačnej analýzy bolo zrejmé, že účinok každého parametra bol zložitý a presný vzťah medzi každým parametrom a koncentráciou CO nebolo možné rozlíšiť, pretože majú kombinovaný vplyv, ktorý nie je možné v terénnom teste ovládať. Výsledky Pearsonovej a čiastočnej korelačnej analýzy však naznačili, že rýchlosť vetrania mala významný negatívny vplyv na koncentráciu CO a že počet vozidiel bol dôležitým faktorom, ale mal menší vplyv na hladiny koncentrácie CO. Vplyv počtu vozidiel na koncentráciu CO bol nestabilný a bol zatienený inými faktormi, ako napríklad výmenou vzduchu. Vzťah medzi počtom vozidiel, prirodzeným vetraním a koncentráciou CO - viacnásobný lineárny model založený na regresnej analýze.

Barbaresi a kol.^[34] sa zaoberali definovaním metódy, ktorá by zabezpečila presnosť pri určení teplôt v podzemných priestoroch budov. Autori porovnali tri rôzne prístupy modelovania podzemnej pivnice používanej ako vinárska pivnica, kde je udržiavanie stabilnej teploty kľúčové pre dozrievanie a trvanlivosť vína. Simulácie boli vykonané pomocou programu EnergyPlus v rámci jedného roka sledovania teploty. Simulácie ukázali, že priebeh teplôt v značnej miere súvisí s okrajovými teplotami pôdy. Z tohto dôvodu si validácia modelu vyžaduje porovnanie simulovaných údajov s údajmi zaznamenanými vo vhodnej prípadovej štúdii.

2.1.3. Tepelný zisk od áut

Tepelné zisky od auta v letnom období

V štúdií od Rocka a kol.^[57] sa prostredníctvom experimentálnej a výpočtovej štúdie skutočnej garáže pri rodinnom dome a vozidla (oba typy sú bežné pre Severnú Ameriku) uvádza, ako sa garáž, vozidlo a rodinný dom navzájom ovplyvňujú. Zisťuje sa časovo premenlivá miera tepelných ziskov z vozidla spolu s tepelnými ziskami na rôznych povrchoch v garáži a v priľahlom vykurovanom priestore. Na simuláciu garáže bol použitý softvér HLITE^[58], špeciálne vyvinutý pre aplikácie na prenos tepla. Vo vytvorenom vstupnom súbore HLITE NDF pre základný prípad A, v ktorom nie je žiadne chladiace vozidlo, boli definované všetky materiály konštrukcií stien, počiatkové teploty, ako aj rôzne tepelné zisky mimo vozidla vrátane prechodnej slnečnej energie dopadajúcej na vonkajšie povrchy garáže^[57].

Na Obr. 2.1 sú uvedené výsledky - hodinové tepelné zisky z vozidla do garáže. Ako sa očakávalo, tepelné zisky z vozidla sú spočiatku veľmi vysoké, takmer 16 000 BTU/h (4,7 kW), ale s časom klesajú, ako sa vozidlo ochladzuje; v druhej hodine sú tepelné straty z vozidla približne polovičné a v tretej hodine sú približne tretinové oproti prvej hodine. Väčšina tepla z chladnúceho vozidla prechádza konvekciou a sálaním do neizolovanej podlahovej betónovej dosky^[57].



Obr. 2.1 Graf hodinových tepelných ziskov z vozidla v garáži^[57].

Experimentálna analýza systému spätného získavania tepla z auta

Faraj a kol.^[59] štúdií navrhuje novú koncepciu rekuperácie tepla aplikovanú na podvozky vozidiel zaparkovaných v podzemných garážach. Výhody tejto koncepcie sú dvojaké: (1) umožňuje ochladzovať prostredie okolo zaparkovaného vozidla a pod jeho kapotou (2) uvažuje sa o využití prebytočného tepla pod kapotou na ohrev/predohrev vody používanej vo verejných budovách.

Meranie sa realizovalo v Bejrúte (Libanone) v lete, keď sa teplota okolia pohybuje medzi 32 °C až 37 °C. Výsledky ukazujú, že teplota vzduchu sa postupne zvyšuje od teploty okolia a dosahuje maximum 52 °C v prípade motora V6 (po 50 minútach) a 45 °C v prípade motora V4 (po 40 minútach). Potom sa teplota začne znižovať v dôsledku vyčerpania akumulovaného tepla v komponentoch vozidla. Výkon získaný na ohrev vody môže dosiahnuť maximálne 500 W počas približne 80 min, čo vedie k zvýšeniu teploty vody o takmer 9 °C. Energia získaná počas približne 1 h sa odhaduje na 0,32 kWh. Z merania sa zistilo, že teplota vody môže dosiahnuť maximum 38 °C namiesto 32 °C, čo je spôsobené vyššou tepelnou zotrvačnosťou väčšieho bloku motora^[59].

2.2. Dynamické simulácie v softvéri DesignBuilder

Simulačný program DesignBuilder^[38] je užívateľsky prívetivé modelovacie prostredie, kde je možné pracovať s virtuálnymi modelmi budov. DesignBuilder používa na generovanie požadovaných údajov dynamický simulačný program EnergyPlus^[39]. Ten sa používa na výpočet potreby energie na vykurovanie, chladenie, vetranie, osvetlenie, elektrické zariadenia a potreby energie v budovách.

Model sieťového prúdenia vzduchu poskytuje možnosť simulovať viaczónové prúdenie vzduchu poháňané vetrom a tiež systémami nútenej distribúcie vzduchu. Model dokáže simulovať aj tepelné a vlhkostné zisky alebo straty zo samotného systému distribúcie vzduchu (napr. potrubia).

2.2.1. Modelovanie prenosu tepla zeminou, vonkajším prostredím a budovou.

Ak je potrebná čo najdetailnejšia a najflexibilnejšia simulácia, odporúča sa využiť spôsob Kiva Full^[38]. V rámci programu EnergyPlus sa Kiva používa na vykonávanie výpočtov dvojrozmerného konečného rozdielu prenosu tepla. Každý základ *Kiva foundation* je reprezentovaný jednou podlahou a stenou, čo znamená, že jednotlivé steny v aplikácii EnergyPlus sú mapované na jednu reprezentatívnu stenu v dvojrozmernom kontexte s využitím váženého priemeru plochy pre akékoľvek nejednotné okrajové podmienky medzi stenami^[38]. Kiva automaticky rozdeľuje dvojrozmernú doménu na sieť, ktorá sa skladá z obdĺžnikových buniek. Diskrétované parciálne diferenciálne rovnice sú riešené pomocou schémy krokovania času konečných rozdielov implicitného striedavého smeru. Táto schéma poskytuje relatívne rýchle výpočty so stabilnými výsledkami, ako to preukázali Kruis a Krarti^[41].

2.3. CFD simulácia v softvéri Flovent

Výpočtová dynamika tekutín (CFD – Computational fluid dynamics) je odvetvie mechaniky tekutín, ktoré využíva numerickú analýzu a dátové štruktúry na riešenie problémov, ktoré zahŕňajú prúdenie tekutín. Softvér Simcenter™ Flovent™^[46] je nástroj na analýzu tepelného modelovania určený na simuláciu prúdenia vzduchu a prenosu tepla v budovách. Prúdenie vzduchu môže byť spôsobené prirodzeným (horúci vzduch stúpa) alebo mechanickým (ventilátory) spôsobom. Vo Flovente sú rovnice zachovania (popisujú 3 zákony zachovania) konvertované do formy konečného objemu. Tieto konvertované rovnice vyžadujú objem, v ktorom sa vypočítajú hodnoty teploty, tlaku a rýchlosti. Preto je priestor (doména riešenia) reprezentovaný v modeli rozdelený na množstvo malých objemov alebo buniek (elementov) siete. Čím je hustejšia sieť v modeli, tým narastá počet bodov a zvyšuje sa presnosť výsledkov, ale na úkor požiadaviek na výpočtovú techniku a čas výpočtu výsledkov^[46].

2.3.1. Turbulentné prúdenie

Turbulentné prúdenie je „náhodný“ pohyb častíc tekutiny, pričom pohyb častíc sa skladá z usporiadaného stredného pohybu a z „náhodných“ fluktuácií. Vplyvom tejto fluktuácie sa molekula dostáva z oblasti väčšej makroskopickej rýchlosti do oblasti s menšou makroskopickou rýchlosťou. Pri náraze na inú molekulu sa spomalí, pričom molekula, do ktorej narazila zrýchli a odovzdá jej časť svojej hybnosti^[47]. Modelovanie turbulencie je kľúčový problém v CFD simuláciách. Neexistuje žiaden model turbulencie, ktorý by bol zaručene presný a použiteľný pre všetky aplikácie v numerických simuláciách. Voľba modelu závisí od typu prúdenia, zložitosti modelu, výpočtového času. Na vyriešenie systému N-S rovníc sú 3 prístupy riešenia:

- metóda priamej simulácie DNS (Direct Numerical Simulation),
- metóda veľkých vírov LES (Large Eddy Simulation),
- metóda časového priemerovania RANS (Reynolds Averaged N-S equations)^[48].

Do metódy RANS patria modely skupiny $k-\varepsilon$. Sem patrí základný model, označovaný ako *Standard $k-\varepsilon$* . Je jedným z najznámejších a najpoužívanějších modelov. Ide o semiempirický model, kde hlavným predpokladom je, že prúdenie je plne turbulentné a efekt molekulárnej viskozity je zanedbateľný. Model rieši transportnú rovnicu pre prenos turbulentnej kinetickej energie k a rýchlosť disipácie turbulentnej kinetickej energie ε .

2.3.2. Štúdie s využitím CFD simulácie

Cho a kol.^[50] uvádzajú, že keď sa optimalizácia návrhu mechanického vetrania zo simulácie CFD použila na referenčné podzemné parkovisko, počet ventilátorov sa mohol znížiť o 30 % a energetická náročnosť systému mechanického vetrania minimálne o 16 %. V dôsledku toho sa predpokladalo, že ročné úspory energie vrátia zvýšenie počiatočných investičných nákladov približne za 5,8 roka. Aj ďalšie štúdie^[51,52,53] podobne preukázali, že správne nastavenie systému vetrania má zásadný význam pre kvalitu vnútorného prostredia.

Eshack a kol.^[54] skúma použitie nástrojov modelovania a simulácie pri navrhovaní mechanických ventilačných systémov. Využívajú sa v ňom dve bežné modelovacie techniky: dynamické modelovanie a modelovanie CFD na simuláciu distribúcie znečisťujúcich látok v mechanicky vetranom priestore. Dynamický prístup ponúka hrubé makroskopické riešenie distribúcie oxidu uhoľnatého (CO), zatiaľ čo metóda CFD poskytuje podrobné rozloženie CO. Oba modely boli overené pomocou terénnych meraní vykonaných v Chennai v Indii a predpovede z modelov boli veľmi blízke so skutočnými nameranými hodnotami. Okrem toho sa v štúdiu analyzovalo, ako výška garáže a miera tvorby CO ovplyvňujú požiadavky na vetranie. Na dynamickú simuláciu rozptylu koncentrácií CO bol použitý softvér CONTAM. Bol zadaný aj rozvrh produkcie emisií na základe sledovaného pohybu áut na parkovisku. Výsledky koncentrácie CO zo CFD simulácie vo výške 1,5 m nad podlahou boli následne porovnané s nameranými hodnotami v 8 meraných bodoch. Takto validovaný model bol následne pre parametrickú analýzu dvoch faktorov a to výšku parkoviska a mieru tvorby CO. Miera tvorby CO je funkciou času prevádzky motora, miery emisií CO a počtu prevádzkovaných vozidiel.

Aminian a kol.^[55] skúmal vplyv umiestnenia výfukových otvorov na zvýšenie kvality vnútorného vzduchu pomocou CFD simulácie a overuje sa na základe publikovaných experimentálnych výsledkov od Asimakopoulou a kol.^[56]. Zistili ich vplyv na štruktúru prúdenia a spotrebu energie. Ukázali, že zvýšenie výmeny vzduchu na zníženie znečisťujúcich látok nemusí byť nevyhnutne vhodnou metódou. Najlepšou metódou na dosiahnutie kvality vnútorného vzduchu a zníženie spotreby energie je vytvorenie vhodného prúdenia vzduchu na parkovisku. Z výsledkov vyplýva, že ak je na parkovisku pozdĺžne vetracie prúdenie a výfukové otvory sú nainštalované v správne určených výškach, zlepši sa kvalita vnútorného prostredia a zníži sa spotreba energie. S prihliadnutím na množstvo koncentrácie CO a účinnosť jeho odstraňovania sa určila vhodná výška, v ktorej by mal byť nainštalovaný výfukový ventil. Z výsledkov vyplýva, že vhodná bezrozmerná výška umiestnenia odsávacích otvorov je v rozmedzí od 0,5 do 0,7. Tým sa na parkovisku vytvorí „jednosmerný výtlačný prúdový vzor“, zníži sa spotreba energie a zníži sa množstvo znečisťujúcich látok^[55].

3 Tézy dizertačnej práce

3.1. Predmet riešenia dizertačnej práce

Predmetom riešenia dizertačnej práce je optimalizácia návrhu veľkoplošných suterénov z hľadiska tepelnej ochrany budov. Najčastejším využitím podzemných priestorov sú parkoviská pod administratívnymi alebo rezidenčnými budovami a nákupnými centrami. Na výslednú vnútornú teplotu vzduchu takýchto podzemných priestorov vplýva veľa faktorov. Ide hlavne o geometriu, konštrukčné riešenie, riešenie vetrania a VZT systémov, tepelnotechnické vlastnosti plášťa, tepelnotechnické vlastnosti zeminy, tepelné zisky od áut a iné.

3.2. Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je analýza a hodnotenie veľkoplošných suterénov. Výsledky z experimentálneho merania boli použité na verifikáciu počítačových simulácií. Použili sa dynamické simulácie rôznych prevádzkových stavov a statická CFD simulácia na zistenie teploty vzduchu a koncentrácie CO. Bol hodnotený vplyv podzemných podlaží na tepelnú ochranu budov.

Ciele:

1. Meranie in situ vnútornej teploty vzduchu v podzemnom parkovisku.
2. Analýza zadávania okrajovej podmienky teploty zeminy.
3. Dynamická počítačová simulácia podzemného parkoviska s prirodzeným vetraním.
4. Porovnanie priemerných teplôt vnútorného vzduchu z experimentálnej analýzy a dynamickej počítačovej simulácie.
5. Analýza vplyvu rôznych prevádzkových stavov mechanického vetrania na teplotu vnútorného vzduchu pomocou dynamickej simulácie.
6. Využitie CFD simulácie pri určovaní koncentrácií oxidu uhoľnatého a rozložení vnútornej teploty vzduchu v podzemnom parkovisku.
7. Stanovenie okrajových podmienok pre tepelnotechnické posúdenie teplovýmenného obalu veľkoplošných suterénov.

3.3. Metódy spracovania dizertačnej práce

Zoznam metód, ktoré boli použité v dizertačnej práci:

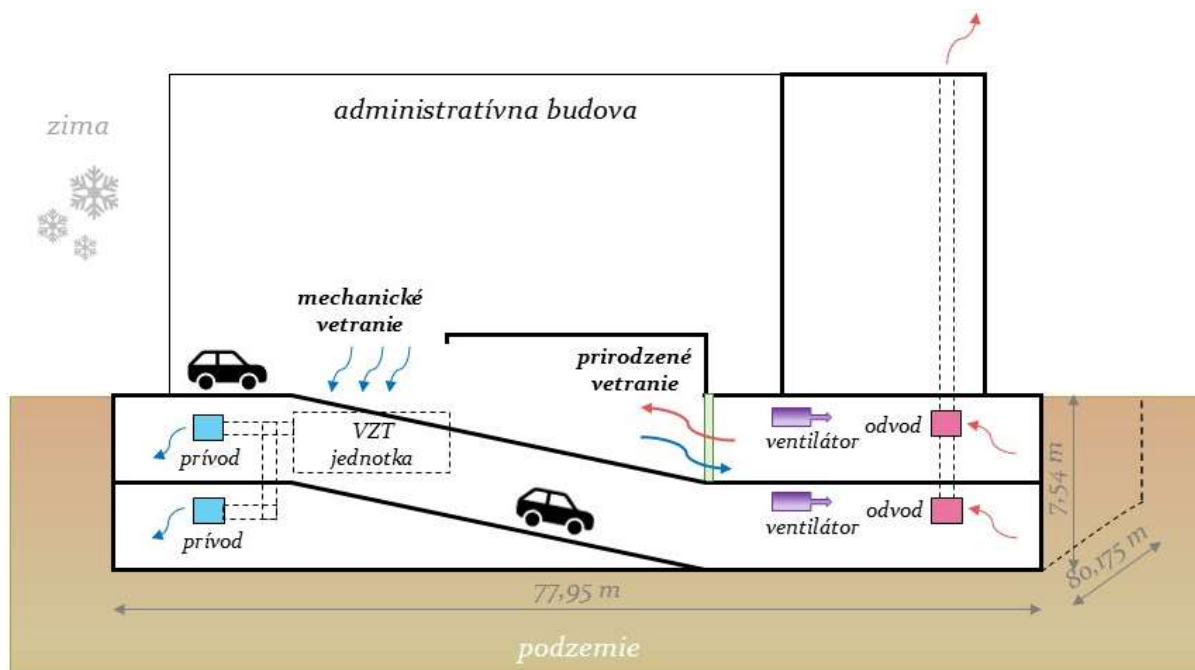
- metóda teoretickej analýzy,
- metóda merania in situ – teplota vnútorného vzduchu v podzemnom parkovisku,
- simulačná metóda – dynamická simulácia s využitím softvéru DesignBuilder (EnergyPlus) a statická simulácia s využitím softvéru Flovent,
- štatistická analýza jednotlivých faktorov – vyhodnotenie výsledkov,
- metóda konfrontácie počítačovej simulácie s merania in situ, a konfrontácie dynamickej a statickej simulácie.

4 Analýza veľkoplošných suterény z hľadiska tepelnej ochrany

4.1. Meranie in situ

Pre účely merania bolo vybrané 2-podlažné podzemné parkovisko v administratívnej budove v Bratislave. Administratívna budova sa nachádza v rýchlo sa rozvíjajúcej hustej mestskej zástavbe v modernom centre mesta. Riešené parkovisko je využívané hlavne cez pracovné dni pre zamestnancov, ale aj pre návštevníkov.

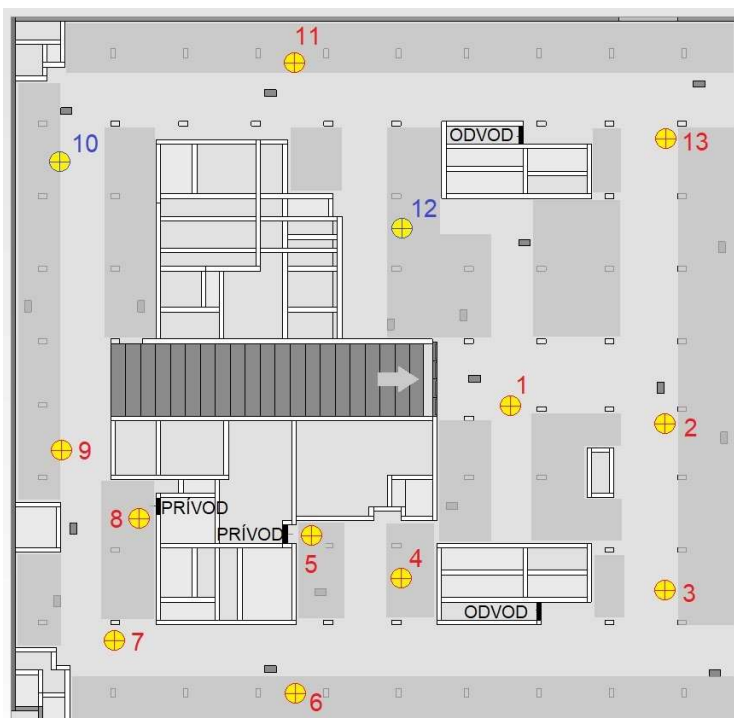
Prirodzené vetranie nastáva pri otvorení aspoň jednej z dvoch brán. Pri spustení mechanického vetrania je nasávaný vzduch do VZT jednotky cez prírodné mriežky pri rampe. Z nej je potom dovádzaný cez potrubie do obidvoch podzemných podlaží. Odvodné mriežky sa nachádzajú na opačnej strane parkoviska, kde sa ventilátormi odvádza znečistený vzduch nad strechu. Na Obr. 4.1 je zobrazená schéma prirodzeného a mechanického vetrania.



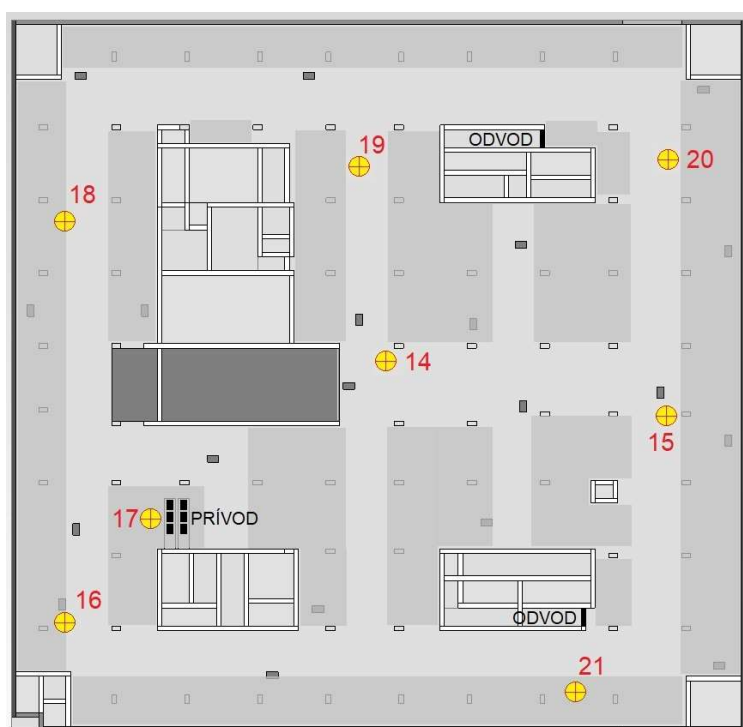
Obr. 4.1 Schéma vetrania podzemné parkoviska.

V tejto podzemnej garáži boli zaznamenávané teploty a relatívne vlhkosti vnútorného a vonkajšieho vzduchu počas obdobia január 2023 až marec 2024 na zachytenie vývoja teploty v každom ročnom období. Na účely merania teploty vnútorného vzduchu a relatívnej vlhkosti v podzemnom parkovisku bol zvolený záznamník mini datalogger testo 174h. Záznamník priebežne meria a archivuje teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu podľa nastaviteľného intervalu. Záznamník údajov (snímač) sa dá prostredníctvom softvéru aj individuálne naprogramovať. Časový interval zberu údajov je od 1 min do 24 h. Počas merania bol nastavený na 1 h.

Na pôdoryse 1.PP (Obr. 4.2) a 2.PP (Obr. 4.3) sú vyznačené polohy umiestnenia snímačov počas merania. Na 1.PP sa nachádzalo 13 snímačov s označením 1-13, z ktorých sa počas merania pokazili snímače 10 a 12 a teda tieto údaje boli vyradené z databázy. Snímač 0 bol umiestnený pred vstupom do podzemného parkoviska na reťazi zavesenej zo stropu nad rampou v exteriéri na meranie vonkajšej teploty vzduchu a relatívnej vlhkosti. Na 2.PP bolo umiestnených 8 snímačov s označením 14-21.



Obr. 4.2 Pôdorys 1.PP s vyznačenou polohou snímačov.



Obr. 4.3 Pôdorys 2.PP s vyznačenou polohou snímačov.

Elektronické rampy umiestnené na 1.PP aj 2.PP hneď za príjazdovou rampou zaznamenávajú počty odchádzajúcich a prichádzajúcich áut. Z meraného obdobia sa vybral jeden typický týždeň z hľadiska prevádzky parkoviska a to 08.01.-14.01.2024. Na 1.PP majú prístup zamestnanci budovy a návštevníci, avšak 2.PP je prístupné iba pre zamestnancov.

4.2. Dynamická simulácia

V tomto kroku sa vytvoril zónový model podzemného parkoviska, zadali sa všetky známe okrajové podmienky, a následne sa model kalibroval na základe reálne nameraných hodnôt teplôt vnútorného vzduchu v podzemnom parkovisku. Tento postup bol zvolený, kvôli čo najlepšiemu priblíženiu sa priemernej hodnote tepelného zisku od auta. Tento tepelný zisk je veľmi náročné presne určiť, keďže závisí od viacerých faktorov. Avšak pre účely tejto práce, postačuje aj priemerná hodnota od áut, s predpokladom že pravidelne parkujú a opakuje sa im podobný režim príjazdov a odjazdov. Po zistení tohto tepelného zisku, je možné nasimulovať rôzne prevádzkové stavy podzemného parkoviska. Sledovaná perióda je od 08.01.2024 do 04.02.2024. V prvom januárovom týždni bola ešte prevádzka parkoviska podobná ako počas posledného decembrového týždňa, kedy boli vianočné prázdniny. Začiatok bol stanovený na 2. januárový týždeň, kedy sa už rozbehol pracovný režim.

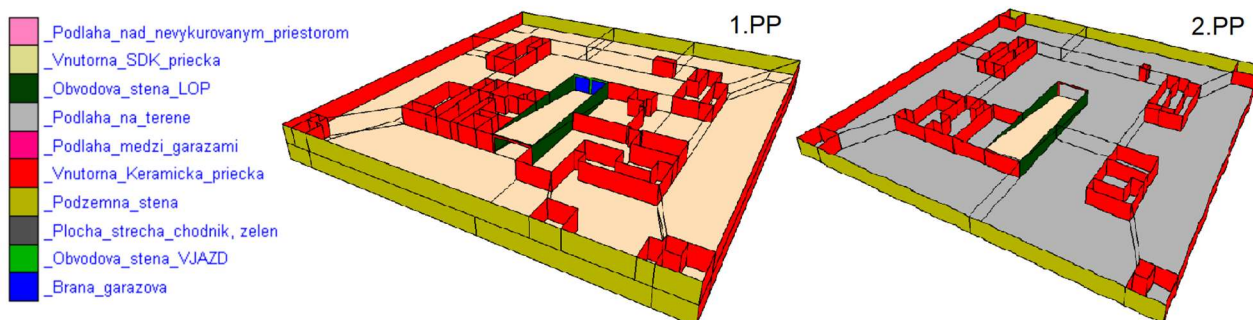
4.2.1. Geometria

Model sa skladá z podzemnej dvojpodlažnej časti a z nadzemnej jednopodlažnej časti. Model podzemného parkoviska má rozmery 80,175 m × 77,95 m × 7,54 m (š × d × v). Zónový model bol vytvorený z vonkajších rozmerov stavby a hranice zóny boli určené stredom vnútorných stien. Zónu parkovisko bolo potrebné rozdeliť na viacero menších zón, ktoré boli oddelené virtuálnymi priečkami, ktoré umožňujú výmenu vzduchu medzi zónami.

4.2.2. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií

Súčinitele prechodu tepla U pre konštrukcie podzemného parkoviska sú:

- Strop nad nevykurovaným priestorom	hr. 510 mm	$U = 0,223 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Vnútorná SDK priečka	hr. 100 mm	$U = 0,586 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Obvodová stena LOP (1.NP)	hr. 200 mm	$U = 0,198 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Podlaha na teréne	hr. 850 mm	$U = 1,313 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Podlaha medzi garážami	hr. 220 mm	$U = 2,444 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Vnútorná keramická priečka	hr. 190 mm	$U = 0,708 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Podzemná stena	hr. 300 mm	$U = 2,779 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Plochá strecha	hr. 1046mm	$U = 0,170 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Obvodová stena pri vjazde	hr. 250 mm	$U = 3,047 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Garážová brána	hr. 50 mm	$U = 0,720 \text{ W/m}^2.\text{K}$



Obr. 4.4 Celkový 3D model s vyznačenými konštrukciami.

4.2.3. Vetranie

Podzemné parkovisko má mechanické vetranie a nie je vykurované. Parkovisko je vybavené aj snímačmi koncentrácie CO vo vzduchu, podľa ktorého sa spúšťajú jednotlivé prevádzkové stupne vetrania. V čase merania bolo toto mechanické vetranie po celý čas vypnuté a tak bolo podzemné parkovisko vetrané iba prirodzene cez dve brány (príjazdová a odjazdová), ktoré sa nachádzajú hneď za rampou vedľa seba. Teplovzdušné clony sa nachádzajú pri bránach nad elektronickými rampami, ktoré sledujú prejazdy áut. Teplovzdušné clony neboli taktiež zapnuté v čase merania a preto neboli zohľadnené v simulácií.

4.2.4. Teplota zeminy

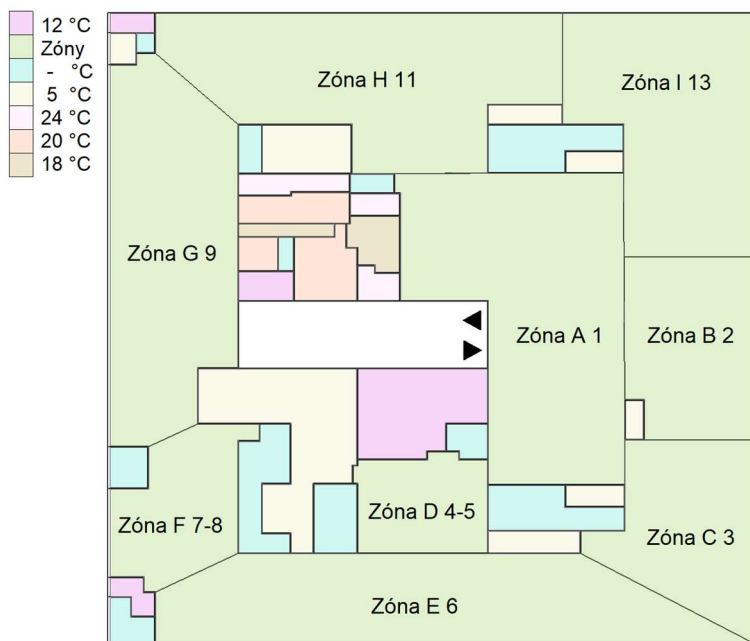
Softvér DesignBuilder poskytuje viacero možností modelovania zeminy, avšak ako sa spomína v predchádzajúcich kapitolách, najpresnejšia metóda je Kiva Basic alebo Kiva Full. Kiva sa používa na vykonávanie výpočtov dvojrozmerného konečného rozdielu prenosu tepla. Každá podzemná stena musí byť priľahlá k podlahe na teréne, aby tak bolo zabezpečené priame spojenie základových konštrukcií, ktoré metóda Kiva vyžaduje. Pre túto simuláciu bola zvolená metóda Kiva Full, ktorá oproti Kiva Basic, umožňuje pre jednotlivé povrchy (stavebné konštrukcie) rozhodnúť používateľom, či je priľahlý k zemine alebo nie.

4.2.5. Klimatické dáta

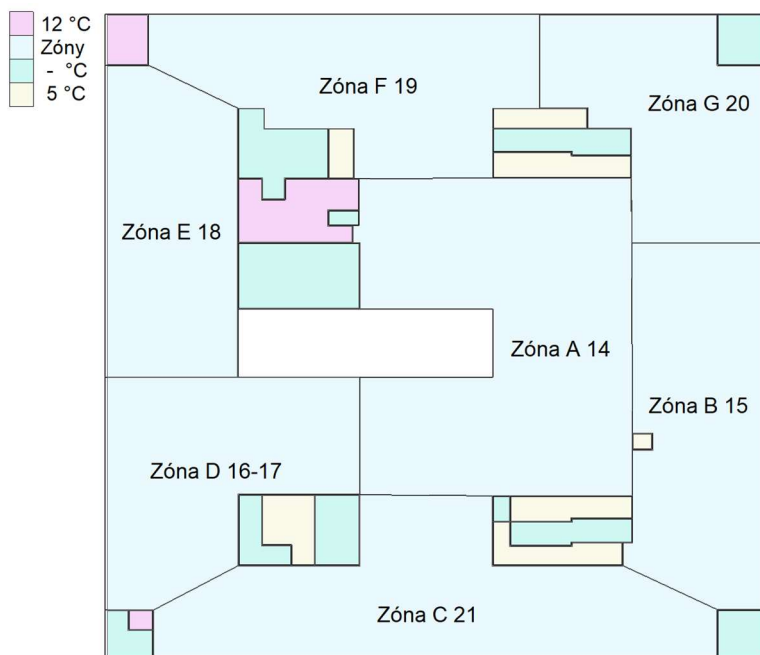
Pre túto simuláciu bol vytvorený nový testovací referenčný klimatický rok. Teploty vonkajšieho vzduchu boli použité z merania zo snímača umiestneného pred vjazdom do parkoviska. Rýchlosť vetra, smer vetra a relatívna vlhkosť vzduchu boli použité z najbližšej meteorologickej stanice SHMÚ v Bratislave na letisku. Ostatné klimatické údaje boli použité z TRKR Bratislava IWEK.

4.2.6. Teploty okolitých priestorov

V podzemných priestoroch sa okrem zóny parkovania nachádzajú aj vykurované technické priestory, ako sú miestnosti elektrických rozvádzačov, strojovne VZT, šatne, toalety, sprchy atď. Priestory ako schodiská, chodby, výťahové šachty a sklady nie sú vykurované. Tieto priestory s teplotami vykurovaného vnútorného vzduchu sú znázornené na Obr. 4.5 a Obr. 4.6 rozdelené podľa farby. Vnútorná teplota vzduchu na 1.NP je 20 °C, ktoré sa nachádza nad časťou podzemného parkoviska.



Obr. 4.5 Pôdorys 1.PP – rozdelenie na zóny.



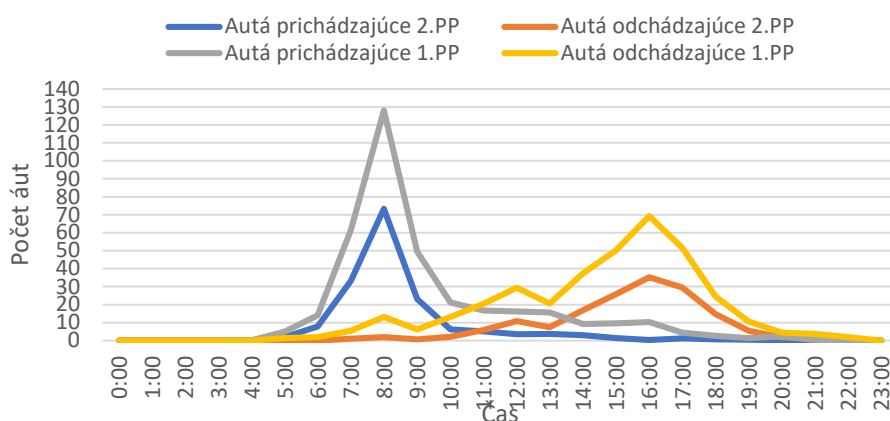
Obr. 4.6 Pôdorys 2.PP – rozdelenie na zóny.

4.2.7. Režim otvárania a zatvárania brán

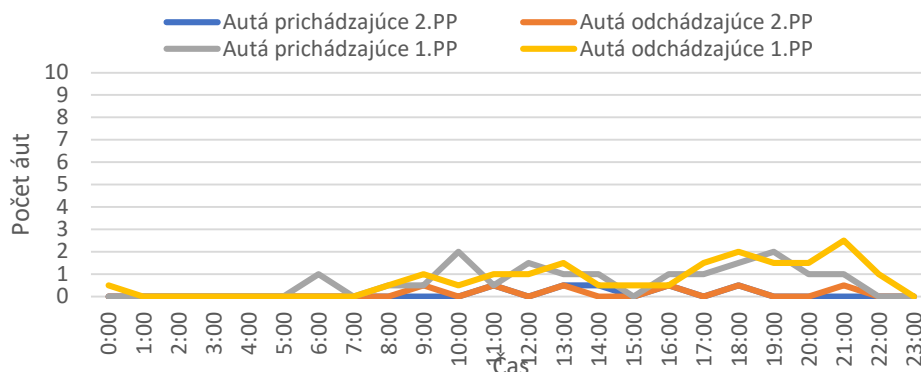
Nastavenie režimu otvárania a zatvárania brán na 1.PP bol stanovený na základe priemerných hodnôt prejazdov cez elektronické rampy za týždeň v dátume 08.01.-14.01.2024. Elektronické rampy zachytávajú časy príjazdov a odjazdov zamestnancov budovy s registrovanou kartou a taktiež vydávajú časové lístky pre návštevníkov budovy.

4.2.8. Tepelné zisky od áut

Zisteniu tepelných ziskov od áut predchádzala analýza dát prejazdov cez elektronické rampy na 1.PP a 2.PP. Z počtov áut za týždeň 08.01.-14.01.2024 bol vytvorený režim priemerného pracovného dňa (Obr. 4.7) a režim priemerného víkendového dňa (Obr. 4.8). Režim víkendových dní bol pridelený aj vianočným prázdninám. Prevádzka budovy počas zimy 2023/2024 bol utlmená počas dvojtýždňových vianočných prázdnin v dátumoch 25.12.2023 – 07.01.2024. Všetky rozvrhy boli nastavené s takýmto rozdelením prevádzky. Prichádzajúce a odchádzajúce autá na 1.PP sú súčtom zamestnancov aj návštevníkov, obsahujú aj prichádzajúce autá, ktoré len cez 1.PP prechádzajú a pokračujú ďalej do 2.PP. Prichádzajúce a odchádzajúce autá na 2.PP sú patriace len zamestnancov, návštevníci tam nemajú prístup.



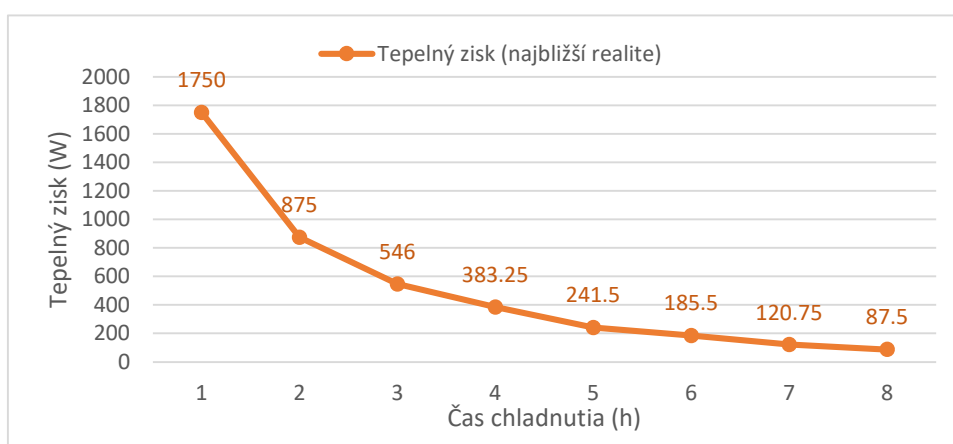
Obr. 4.7 Graf – režim priemerného pracovného dňa.



Obr. 4.8 Graf – režim priemerného víkendového dňa.

Ďalej bolo potrebné určiť priemerný čas parkovania. Z analýzy dát vyplýva, že pre pracovný deň to je 7 hodín pre zamestnancov a 1 hodina pre návštevníkov. Pre víkendový deň boli použité reálne časy dĺžky parkovania. Tieto údaje platia pre autá na 1.PP aj 2.PP. Zo štúdie^[57] zameranej na tepelné zisky od auta v letnom období je zjavné, že tepelné zisky klesajú exponenciálne po dobu cca 8 hodín počas letného obdobia. V tejto štúdii bolo zistený zisk v prvú hodinu 4 690 W.

Na základe tohto predpokladu bola pre účely tejto práce vytvorená krivka odhadovaného priebehu tepelných ziskov. Vychádzalo sa z predpokladu, že simulované obdobie je zimné a väčšina áut, ktoré prichádzajú do podzemného parkoviska nemajú nahriatu karosériu od slnečného žiarenia a preto bude tepelný zisk oveľa nižší. Zistilo sa, že pri zachovaní exponenciálne klesajúcej krivke, najbližší realite je tepelný zisk od auta v prvej hodine 1 750 W (Obr. 4.9).



Obr. 4.9 Graf – priemerný tepelný zisk od auta.

4.2.9. Výsledky

Tab. 4.1 Porovnanie minimálnej týždennej teploty vnútorného vzduchu na 1.PP.

Ozn.	Minimálna týždenná teplota vnútorného vzduchu (°C)											
	2.týždeň 08.01-14.01.2024			3.týždeň 15.01-21.01.2024			4.týždeň 22.01-28.01.2024			5.týždeň 29.01-04.02.2024		
1.PP	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)
1	14,5	16,5	12,1	16	16	0	16	16,5	3	17	15	-13,3
2	15,5	16	3,1	17	16,5	-3	17	17	0	18	15,5	-16,1
3	16	17	5,9	17,5	17,5	0	17,5	17,5	0	18,5	16,5	-12,1
4-5	16,5	16,5	0	18	17	-5,9	18	17	-5,9	18,5	16,5	-12,1
6	17	17,5	2,9	18	18	0	18	18	0	19	17	-11,8
7-8	17,5	17,5	0	18	18	0	18	16,5	-9,1	18,5	17	-8,8
9	17	17	0	17,5	17	-2,9	17,5	16,5	-6,1	18	16	-12,5
11	16	17,5	8,6	17,5	17,5	0	17,5	17,5	0	18	16,5	-9,1
13	16	17	5,9	17	17	0	17	17,5	2,9	18	16	-12,5

Poznámka: Z-zóna(simulácia), S-snímač(meranie), P-percentuálna odchýlka

Tab. 4.2 Porovnanie minimálnej týždennej teploty vnútorného vzduchu na 2.PP.

Ozn.	Minimálna týždenná teplota vnútorného vzduchu (°C)											
	2.týždeň 08.01-14.01.2024			3.týždeň 15.01-21.01.2024			4.týždeň 22.01-28.01.2024			5.týždeň 29.01-04.02.2024		
2.PP	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)
14	18	17	-5,9	18	16,5	-9,1	18	16,5	-9,1	19	15,5	-22,6
15	18	17,5	-2,9	18	17	-5,9	18	17	-5,9	19	16	-18,8
16-17	18	19	5,3	18	18,5	2,7	18,5	18	-2,8	18,5	18	-2,8
18	18	18,5	2,7	18	18	0	18,5	18	-2,8	18,5	17,5	-5,7
19	18	18,5	2,7	18	18	0	18,5	18	-2,8	19	17,5	-8,6
20	18	18	0	18	17,5	-2,9	18,5	17	-8,8	18,5	16,5	-12,1
21	18	18	0	18	18	0	18,5	18	-2,8	19	17	-11,8

Tab. 4.3 Porovnanie priemernej týždennej teploty vnútorného vzduchu na 1.PP.

Ozn.	Priemerná týždenná teplota vnútorného vzduchu (°C)											
	2.týždeň 08.01-14.01.2024			3.týždeň 15.01-21.01.2024			4.týždeň 22.01-28.01.2024			5.týždeň 29.01-04.02.2024		
1.PP	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)
1	17,3	17,5	1,1	18,0	17,0	-5,9	18,5	16,8	-10,1	18,8	16,0	-17,5
2	17,8	18,0	1,1	18,4	17,0	-8,2	18,9	17,4	-8,6	19,1	16,7	-14,4
3	18,2	19,0	4,2	18,7	18,6	-0,5	19,2	18,3	-4,9	19,4	17,8	-9
4-5	17,9	19,6	8,7	18,9	19,3	2,1	19,3	19,1	-1,0	19,6	18,4	-6,5
6	18,5	19,5	5,1	19,1	19,2	0,5	19,4	19,0	-2,1	19,7	18,3	-7,7
7-8	18,6	19,5	4,6	19,1	19,3	1,0	19,4	19,0	-2,1	19,6	18,4	-6,5
9	18,2	18,0	-1,1	18,7	17,5	-6,9	19,0	17,5	-8,6	19,3	17,0	-13,5
11	18,1	18,5	2,2	18,6	18,3	-1,6	19,1	18,0	-6,1	19,3	17,4	-10,9
13	17,9	18,2	1,6	18,5	17,9	-3,4	18,9	17,7	-6,8	19,2	16,9	-13,6

Tab. 4.4 Porovnanie priemernej týždennej teploty vnútorného vzduchu na 2.PP.

Ozn.	Priemerná týždenná teplota vnútorného vzduchu (°C)											
	2.týždeň 08.01-14.01.2024			3.týždeň 15.01-21.01.2024			4.týždeň 22.01-28.01.2024			5.týždeň 29.01-04.02.2024		
2.PP	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)	Z	S	P(%)
14	19,2	17,5	-9,7	19,4	17,1	-13,5	19,6	16,8	-16,7	19,8	15,9	-24,5
15	19,3	18,0	-7,2	19,5	17,5	-11,4	19,7	17,2	-14,5	19,9	16,5	-20,6
16-17	19,4	19,4	0	19,6	19,0	-3,2	19,7	18,7	-5,3	19,9	18,3	-8,7
18	19,4	18,6	-4,3	19,5	18,2	-7,1	19,7	18,0	-9,4	19,9	17,6	-13,1
19	19,5	18,8	-3,7	19,7	18,5	-6,5	19,8	18,2	-8,8	20,0	17,6	-13,6
20	19,4	18,0	-7,8	19,6	17,7	-10,7	19,8	17,4	-13,8	19,9	16,6	-19,9
21	19,5	18,9	-3,2	19,7	18,5	-6,5	19,9	18,2	-9,3	20,1	17,6	-14,2

Poznámka: Z-zóna(simulácia), S-snímač(meranie), P-percentuálna odchýlka

4.3. Dynamická simulácia pre alternatívy prevádzkových stavov

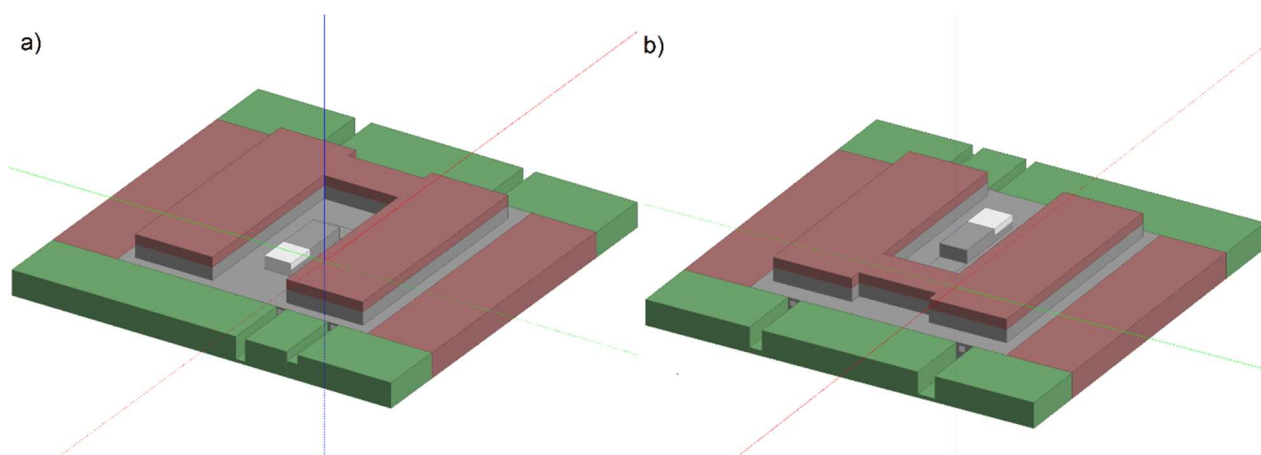
V prechádzajúcej kapitole bola popisovaná dynamická simulácia s prirodzeným vetraním. V tejto kapitole sa riešia prevádzkové stavy podzemného parkoviska so zahrnutým mechanickým vetraním, ktoré zabezpečujú prírodné a odvodné ventilátory. Boli vybrané 3 prevádzkové stavy, ktoré boli vyskladané z 3 stupňov režimu mechanického vetrania (Tab. 4.6). Každý z týchto prevádzkových stavov má 2 varianty podľa výplne vstupného otvoru a to brána, ktorá sa otvára podľa rozvrhu alebo bez brány, cez ktorú neustále prúdi vzduch. Týchto 6 simulácií je zobrazených v Tab. 4.5.

Tab. 4.5 Zoznam simulácií s mechanickým vetraním.

Č.	Prevádz. stav	Vstupný otvor	Typ vetrania	Popis vetrania
1	MIX	brána	zmiešané	režim ventilátorov kopíruje reálnu prevádzku parkoviska (so špičkami)
2		bez brány		
3	HYG	brána	hygienické	odvodné ventilátory zapnuté na minimum, prírodné ventilátory vypnuté
4		bez brány		
5	MAX	brána	maximálne	odvodné ventilátory zapnuté na maximum, prírodné ventilátory zapnuté na maximum
6		bez brány		

4.3.1. Geometria

3D model (Obr. 4.10) bol doplnený o prírodné a odvodné mriežky s ventilátormi, ktoré boli pridané na dve vonkajšie steny priľahlé k zemi. V tomto prípade bolo potrebné vytvoriť ďalšie objemy (zelené kvádre), ktoré zdefinujú kontakt steny so zeminou. Boli vynechané priestory okolo prírodných a odvodných mriežok, kvôli zabezpečeniu prístupu vzduchu.



Obr. 4.10 3D model doplnený o prírodné a odvodné mriežky s ventilátormi – a) pohľad z prednej strany b) zo zadnej strany.

4.3.2. Vetrание

Mechanické vetranie má určené 3 stupne režimu, ktoré závisia na koncentrácií oxidu uhoľnatého (CO) vo vzduchu. V Tab. 4.6 a Tab. 4.7 je zobrazené percentuálne využitie maximálneho prietoku jednotlivých prírodných a odvodných mriežok.

Tab. 4.6 Stupne režimu mechanického vetrania pre 1.PP.

1.PP	Ventilátor	Prietok (m ³ /h)	Hygienické vetranie	Koncentrácia CO > 50 ppm	Koncentrácia CO > 75 ppm
			0-stupeň	1-stupeň	2-stupeň
F78	Prívod	10 500	0%	100%	100%
G9	Prívod	18 000	0%	0	100%
SPOLU	Prívod	28 500	0 m³/h	10 500 m³/h	28 500 m³/h
C3	Odvod	14 600	40%	70%	100%
I13	Odvod	21 000	40%	70%	100%
SPOLU	Odvod	35 600	14 240 m³/h	24 920 m³/h	35 600 m³/h
<i>Podtlak</i>			14 240 m ³ /h	14 420 m ³ /h	7 100 m ³ /h

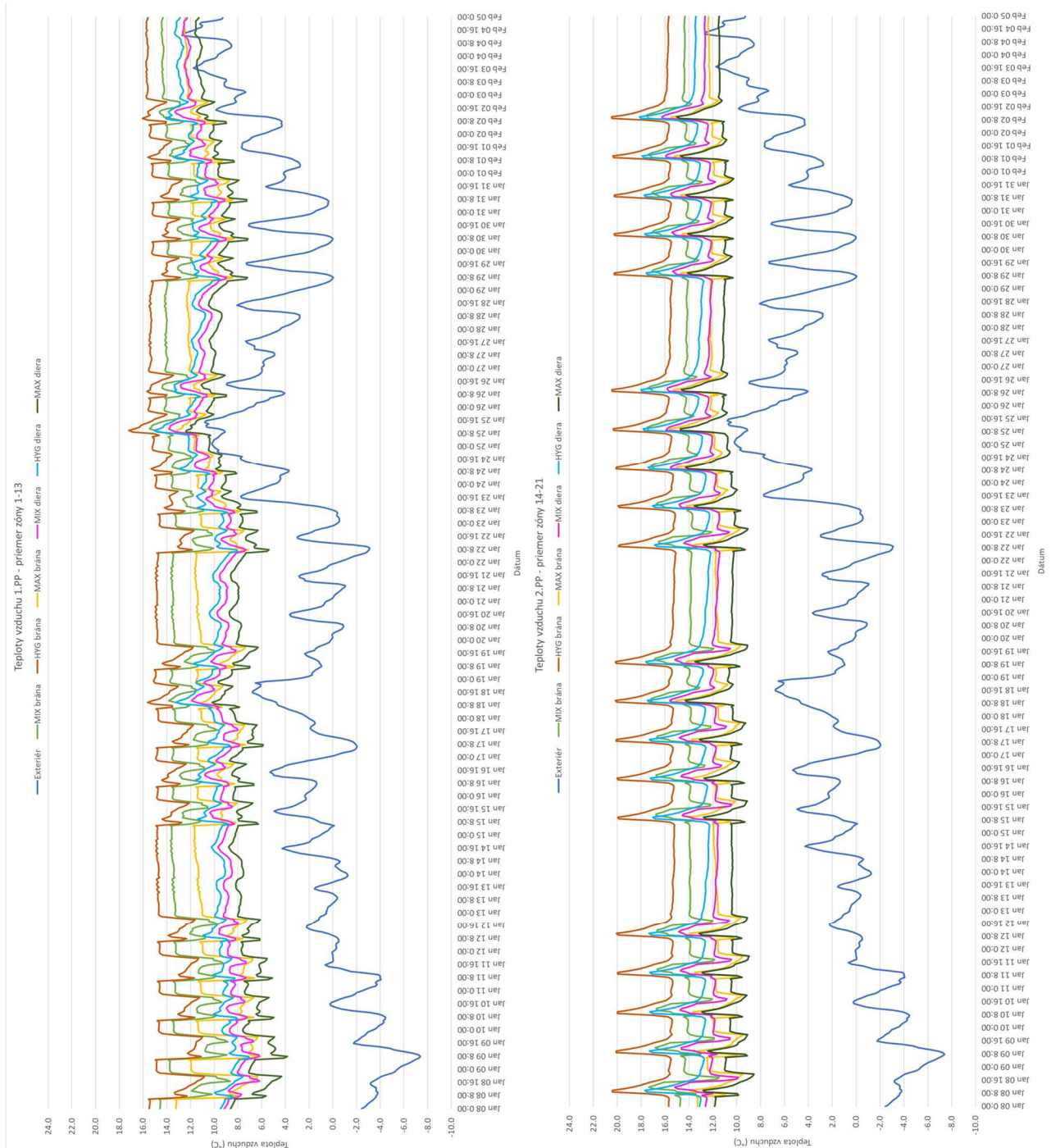
Tab. 4.7 Stupne režimu mechanického vetrania pre 2.PP.

2.PP	Ventilátor	Prietok (m ³ /h)	Hygienické vetranie	Koncentrácia CO > 50 ppm	Koncentrácia CO > 75 ppm
			0-stupeň	1-stupeň	2-stupeň
D1617	Prívod	11 500	0	40%	100%
SPOLU	Prívod	11 500	0 m³/h	4 600 m³/h	11 500 m³/h
B15	Odvod	5 200	40%	70%	100%
G20	Odvod	7 500	40%	70%	100%
SPOLU	Odvod	12 700	5 080 m³/h	8 890 m³/h	12 700 m³/h
<i>Podtlak</i>			5 080 m ³ /h	4 290 m ³ /h	1 200 m ³ /h

Mriežky mechanického vetrania sa nachádzajú na vnútorných stenách technickým miestností. Avšak softvér DesignBuilder neponúka možnosť umiestnenia komponentov mechanického vetrania do priestoru zóny. Jediný spôsob ako v priestore parkoviska (ktorý je rozdelený na viacero menších zón) namodelovať prírodné a odvodné mriežky, je umiestniť ich na steny, ktoré majú prístup k exteriéru a vonkajšiemu vzduchu, pretože ten vstupuje a vystupuje cez mriežky.

4.3.3. Výsledky

Na Obr. 4.11 a sú zobrazené priemerné hodnoty teploty vzduchu pre 1.PP a 2.PP pre všetky prevádzkové stavy.



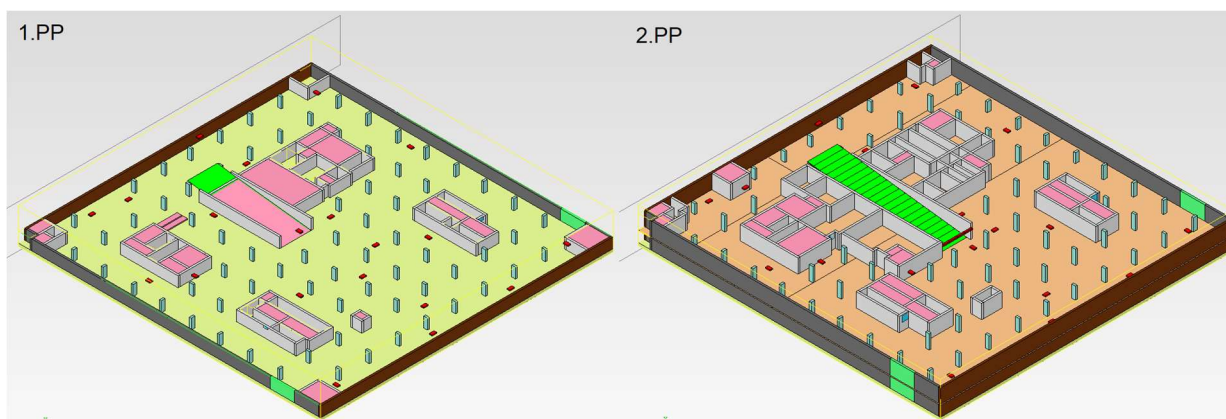
Obr. 4.11 Grafy teploty vzduchu na 1.PP a 2.PP.

4.4. CFD simulácia

Z dynamickej simulácie bol vybraný špičkový stav, kedy bola priemerná teplota vzduchu v interiéri na 1.PP a 2.PP aj v exteriéri najnižšia vo všetkých 6 simuláciách. Simulácia CFD teda detailne simuluje stav 9.1.2024 o 9:00 pri zapnutom mechanickom vetraní a otvorenej bráne. To znamená, že prírodné aj odvodné mriežky sú spustené na 100% a posuvné ventilátory sú v prevádzke. V tomto čase je takzvaná ranná špička kedy má parkovisko špičkové tepelné zisky od automobilov a tým pádom aj koncentrácie CO, ale zároveň je najviac otváraná aj príjazdová brána, ktorá ochladzuje vnútorné prostredie s najnižšou nameranou teplotou v zime $-7,24^{\circ}\text{C}$.

4.4.1. Geometria

Model podzemného parkoviska má rozmery $80,5\text{ m} \times 78,0\text{ m} \times 10,0\text{ m}$ (š $\times$ d $\times$ v). Poloha prírodných a odvodných mriežok bola zachovaná presne podľa skutočnosti, keďže to softvér Flovent umožňuje. Na Obr. 4.12 sú zobrazené 3D modely. Doména 1.PP a 2.PP bola rozdelená na zóny na základe polohy brány, prírodných a odvodných mriežok, tak aby sa veľkosti a umiestnenie najviac podobalo zónam z dynamickej simulácie.



Obr. 4.12 3D model podzemného parkoviska.

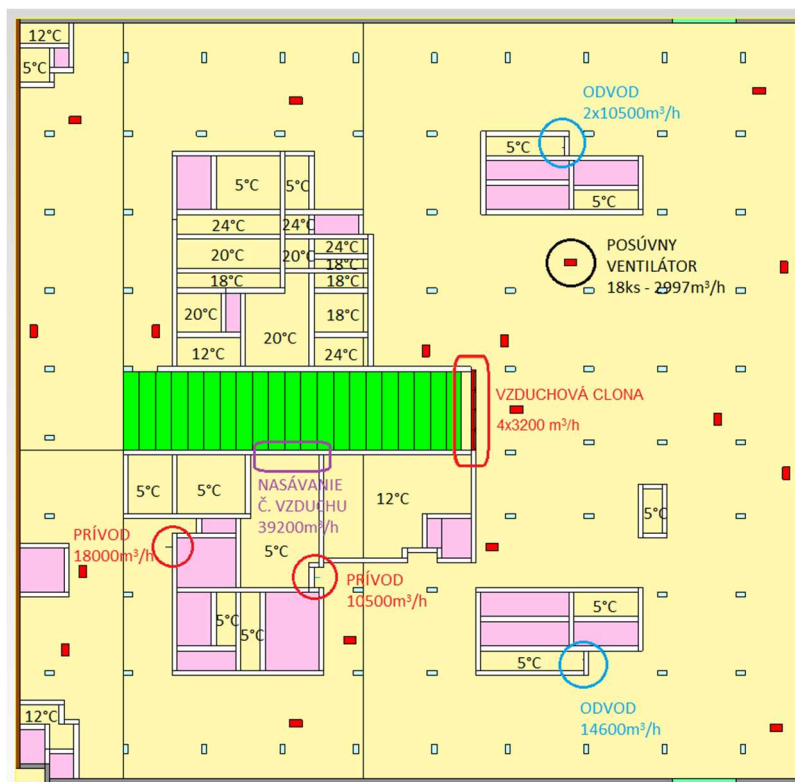
4.4.2. Teplota okolitých priestorov

Vnútorné tepelné zisky pochádzajú z vykurovaných technických priestorov. Tieto priestory s teplotami vykurovaného vnútorného vzduchu sú znázornené na Obr. 4.13 a Obr. 4.14. Vnútorná teplota vzduchu na 1. NP, nachádzajúce sa nad časťou podzemného parkoviska, je 20°C .

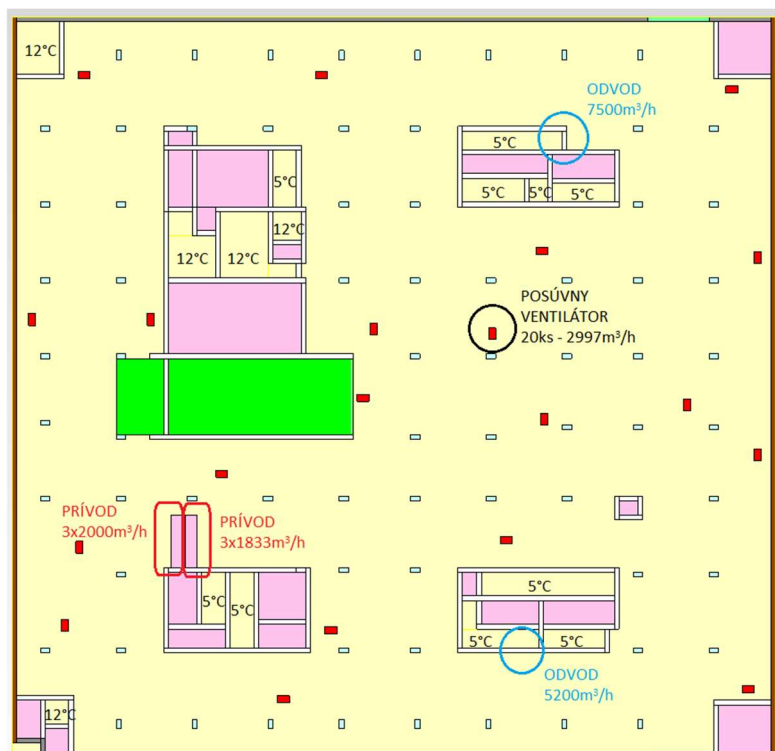
4.4.3. Vetranie

Vetranie hromadných garáží upravuje STN 73 6058, ktorá definuje potrebnú výmenu vetracieho vzduchu pre garáže. Podzemné parkovisko má mechanické vetranie a nie je vykurované. Vetranie je navrhnuté v mierne podtlakovom režime. Prívod vzduchu je riešený bodovo cez protidažďové žalúzie

osadené na stenách strojovne v 1. podzemnom podlaží. Rovnako je vzduch odvádzaný bodovo cez protidažďové žalúzie osadené na stenách strojovni. Pohyb objemu vzduchu je riešený pomocou posuvných prúdových ventilátorov Systemair IV 50 - 4/8.



Obr. 4.13 Pódorys 1.PP s vyznačeným zariadeniami mechanického vetrania.



Obr. 4.14 Pódorys 2.PP s vyznačeným zariadeniami mechanického vetrania.

4.4.4. Emisie oxidu uhoľnatého (CO)

V podzemných parkoviskách sa vyskytujú škodliviny produkované autami. Vetranie podzemných parkovísk je potrebné pre odstránenie oxidu uhoľnatého a iných škodlivých látok, ktoré majú nepriaznivý vplyv na ľudský organizmus a vytvárajú skleníkový efekt. Koncentrácia vonkajšieho privádzaného vzduchu je 10 ppm. Pre simuláciu boli určené emisie CO v reálnom špičkovom stave cez pracovný deň o 9:00 v Tab. 4.8. Bol použitý výpočet podľa STN 73 6058 zohľadňujúci faktory:

- objem podzemného parkoviska,
- frekvenciu výmeny vozidiel na jednom parkovacom mieste,
- počet áut parkujúcich v 1.PP a 2.PP,
- počet áut, ktoré len prechádzajú cez 1.PP a zaparkujú až na 2.PP,
- priemerná dĺžka trasy auta, ktorú prejde po rovine, stúpaní a klesaní po rampe,
- čas strávený státím pred elektronickou rampou na voľnobehu.

Tab. 4.8 Emisie CO v podzemnom parkovisku.

Podzemné podlažie	Emisie CO (m ³ /h)	Emisie CO (kg/s)
1.PP	0,8788	0,000283169
2.PP	0,3594	0,000115807

4.4.5. Teplota zeminy

Okrajová podmienka teplota pôdy v CFD simulácií bola stanovená výpočtom z dynamickej simulácie. Pri použití metódy modelovania zeminy Kiva v DesignBuilderi, nie je možné zistiť exteriérové povrchové teploty podzemných konštrukcií, ale je možné si tieto teploty dopočítať podľa upraveného vzorca šírenia tepla vedením, keďže program zobrazuje výsledky interiérových povrchových teplôt a aj tepelný tok cez konštrukcie.

$$\theta_{se} = \theta_{si} - (q \cdot R) \quad 4.1$$

kde:

q - tepelný tok v konštrukcií (W/m²),

R - tepelný odpor konštrukcie (m².K/W),

θ_{se} - exteriérová povrchová teplota (°C),

θ_{si} - interiérová povrchová teplota (°C).

Teplota pôdy pod podlahou na 2.PP bola nastavená na 11 °C a teplota pôdy pri stenách na 7,5 °C. Výpočtová vonkajšia teplota vzduchu pre Bratislavu v zimnom období je -11 °C, avšak bol vybraný stav vnútorného prostredia podzemného parkoviska v čase keď vonkajšia teplota vzduchu bola nameraná na -7,24 °C.

4.4.6. Tepelné zisky od áut

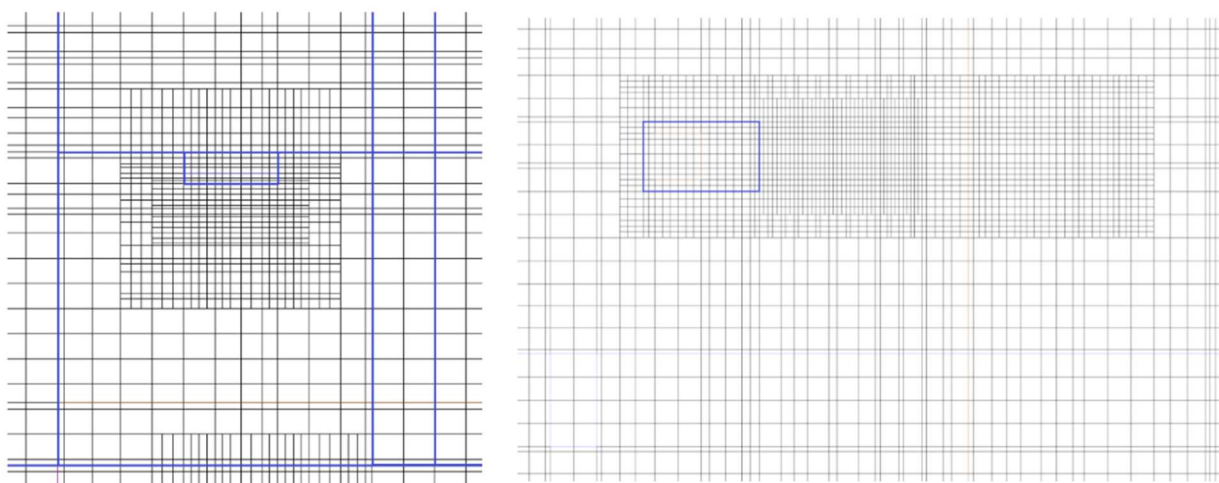
Počet prichádzajúcich a odchádzajúcich áut a teploty vnútorného vzduchu boli známe, bolo teda možné simulovať prevádzku parkoviska a odvodiť tak približné tepelné zisky od áut. Pre simuláciu CFD bol vybraný špičkový stav využívania parkoviska, konkrétne 9.1. ráno po 9.00 h, keď na parkovisko prišlo najviac áut a zároveň bola vtedy najnižšia vonkajšia teplota vzduchu. V Tab. 4.9 sú uvedené tepelné zisky z automobilov vybrané z výsledkov dynamickej simulácie.

Tab. 4.9 Tepelné zisky od áut .

1.PP Zóna	1.PP Tepelný zisk (W)	2. PP Zóna	2. PP Tepelný zisk (W)
1	20217	14	35544
2	8756	15	21738
3	8963	16-17	19669
4-5	4681	18	17809
6	17076	19	21166
7-8	6254	20	17265
9	16301	21	26592
11	17897	-	-
13	14665	-	-
SPOLU	114810	SPOLU	159783

4.4.7. Tvorba siete

Priestorová sieť riešenia rozdeľuje oblasť domény (priestor riešenia simulácie) na súbor neprekývajúcich sa susediacich konečných objemov nazývaných bunky siete. Túto sieť je potom možné spresniť v oblastiach zložitého prúdenia. (Obr. 4.15). Tvorba siete je kompromisom medzi presnosťou a rýchlosťou^[46].



Obr. 4.15 Detailná priestorová sieť posuvného ventilátora v reze a v pôdoryse.

4.4.8. Výsledky

V CFD výpočtoch sa simulovala teplota vnútorného vzduchu, rýchlosť prúdenia vzduchu a koncentrácia CO. Výsledky v pôdorysných rezoch sú zdokumentované na Obr. 4.16. Úroveň výsledkov je 1 500 mm nad podlahou. V Tab. 4.10 a

Tab. 4.11 sú uvedené výsledky priemerných hodnôt koncentrácií CO a teploty vnútorného vzduchu na 1.PP a 2.PP.

Tab. 4.10 Priemerná koncentrácia CO a priemerná teplota vnútorného vzduchu na 1.PP.

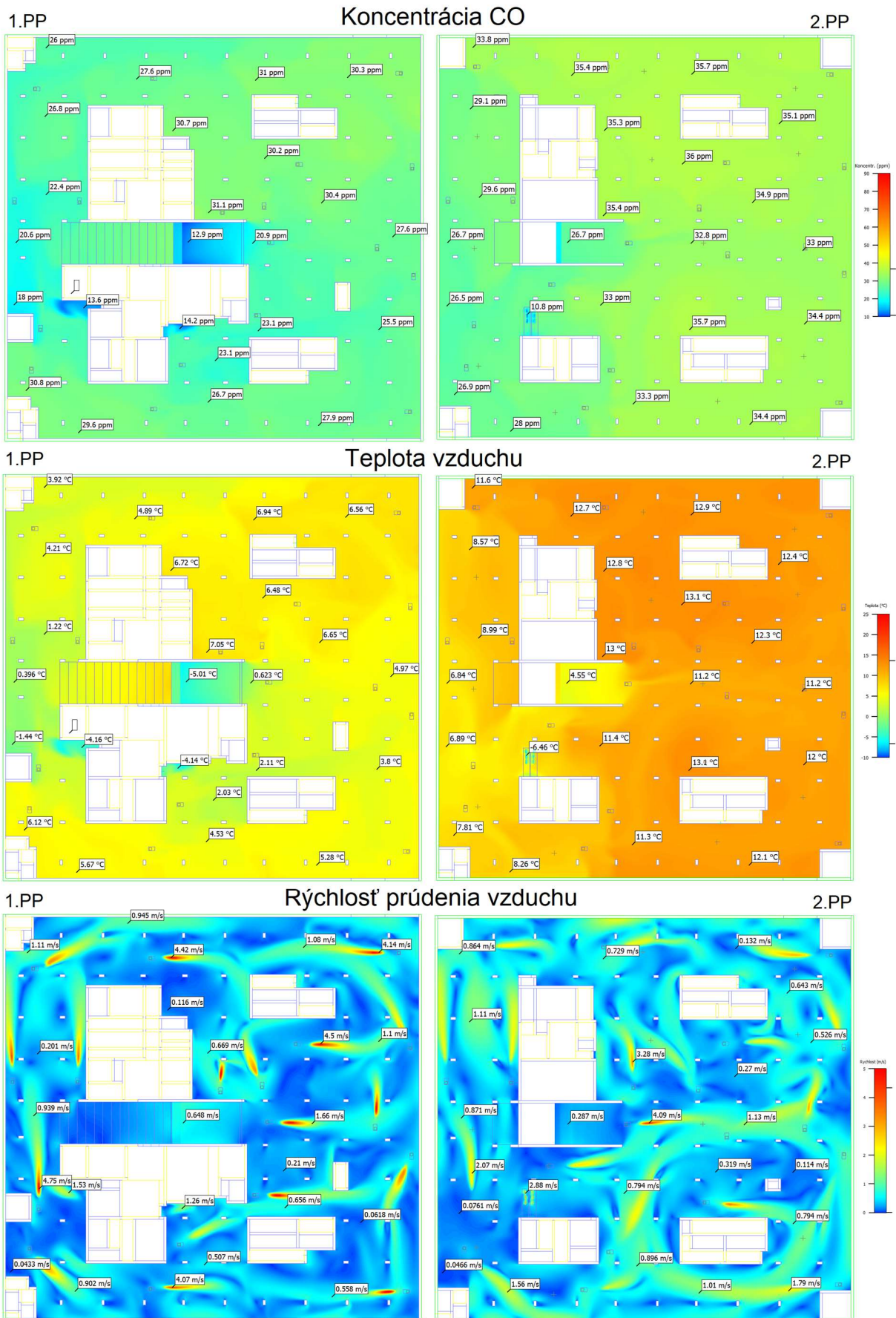
1.PP - Zóna	Priemerná teplota vnútorného vzduchu (°C)	Priemerná teplota vnútorného vzduchu (°C)	Priemerná koncentrácia CO (ppm)
	dynamická simulácia	CFD simulácia	CFD simulácia
1	3,69	5,70	27,9
2	5,73	5,55	28,5
3	6,88	4,91	27,3
4-5	7,24	2,24	23,3
6	7,73	5,37	28,2
7-8	5,64	3,81	26,5
9	6,06	2,28	23,8
11	6,64	4,99	27,8
13	6,35	6,92	27,8
Priemer	6,22	4,64	27,2

Tab. 4.11 Priemerná koncentrácia CO a priemerná teplota vnútorného vzduchu na 2.PP.

2.PP - Zóna	Priemerná teplota vnútorného vzduchu (°C)	Priemerná teplota vnútorného vzduchu (°C)	Priemerná koncentrácia CO (ppm)
	dynamická simulácia	CFD simulácia	CFD simulácia
14	12,96	12,00	34,2
15	13,82	11,80	34,0
16-17	10,76	7,85	28,2
18	12,70	9,15	29,9
19	13,88	12,60	35,4
20	14,24	12,30	35,0
21	13,23	10,10	31,2
Priemer	13,08	10,90	32,6

Mechanické vetranie zabezpečuje splnenie požiadaviek normy STN 73 6058, Zmena b - 8/1989 na 1.PP aj 2.PP, na najvyššiu prípustnú hodnotu koncentrácie CO 87 ppm. Priemerná teplota vnútorného vzduchu z dynamickej simulácie na 1.PP je 6,22 °C a zo CFD simulácie je 4,64 °C. Rozdiel priemerných teplôt vnútorného vzduchu je 1,58 K, avšak v dynamickej simulácii bez brány nebolo možné presne simulovať objemové prietoky vzduchu v prívode a ich polohu, čo má za následok vyššie teploty ako v CFD simulácii, v ktorej sú objemové prietoky nastavené na presné

hodnoty. Priemerná teplota vnútorného vzduchu z dynamickej simulácie na 2.PP je 13,08 °C a zo CFD simulácie je 10,9 °C. Rozdiel medzi simuláciami je 2,18 K.



Obr. 4.16 Výsledky CFD simulácie.

4.5. Tepelná izolácia stropu nad nevykurovaným priestorom

Hodnoty teploty vnútorného vzduchu sú dôležité pri výpočte súčiniteľa prechodu tepla U stropu nad nevykurovaným priestorom a pri návrhu hrúbky tepelnej izolácie. Požiadavky na súčiniteľ prechodu tepla U sa delia podľa rozdielu teplôt vnútorného vzduchu o 5 K podľa normy STN 73 0540-2.

Dynamická simulácia s mechanickým vetraním s maximálnym výkonom vetrania ukázala, že priemerná teplota vzduchu v podzemnom parkovisku bez brány v prejazdnom otvore klesne tesne pod 5 °C iba počas dvoch pracovných dní a to 8.1 a 9.1. v najchladnejšom týždni v roku. V tomto prípade je možné považovať najnižšiu teplotu vnútorného vzduchu v nevykurovanom priestore 5 °C a teda teplotný rozdiel s priestorom nad podzemným parkoviskom je 15 K. Tento prevádzkový stav je však nepravdepodobný.

Dynamická simulácia s mechanickým vetraním so zmiešaným výkonom vetrania podľa reálnej prevádzky ukázala, že priemerná teplota vzduchu v podzemnom parkovisku s bránou klesne tesne pod 10 °C iba počas štyroch pracovných dní a to 8.1 až 11.1. v najchladnejšom týždni v roku. V tomto prípade je možné považovať najnižšiu teplotu vnútorného vzduchu v nevykurovanom priestore 10 °C a teda teplotný rozdiel s priestorom nad podzemným parkoviskom je 10 K. Tento prevádzkový stav má vyššiu pravdepodobnosť uskutočnenia.

Skladba stropu nad nevykurovaným priestorom bola stanovená podľa odporúčanej hodnoty súčiniteľa prechodu tepla $U_{r3} = 0,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ podľa normy STN 73 0540-2 pri rozdieli teplôt do 20 K s tepelným tokom zhora nadol.

Skladba stropu nad nevykurovaným priestorom s $U = 0,223 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$:

- | | | |
|--------------------------|-------------|--|
| • Keramická dlažba | hr. 10 mm, | $\lambda = 0,800 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ |
| • Cementové lepidlo | hr. 5 mm, | $\lambda = 0,850 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ |
| • Prostý betón | hr. 55 mm, | $\lambda = 1,300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ |
| • PE fólia | | |
| • EPS expand. polystyrén | hr. 60 mm, | $\lambda = 0,039 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ |
| • Železobetón | hr. 280 mm, | $\lambda = 1,580 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ |
| • Minerálna vlna | hr. 100 mm, | $\lambda = 0,041 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ |

V prípade, že rozdiel teplôt je do 15 K a odporúčaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla stropu nad nevykurovaným priestorom je $U_{r3} = 0,35 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ s tepelným tokom zhora nadol, postačovala by tepelná izolácia z minerálnej vlny hrúbky 50 mm. Vtedy by skladba stropu mala $U = 0,306 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Ak rozdiel teplôt je do 10 K a odporúčaná hodnota súčiniteľa prechodu tepla stropu nad nevykurovaným priestorom $U_{r3} = 0,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ s tepelným tokom zhora nadol, nebola by potrebná žiadna tepelná izolácia zo strany nevykurovaného priestoru. Strop bez tepelnej izolácie zo strany nevykurovaného priestoru má $U = 0,489 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Záver

Meranie in situ v dvojpodlažnom podzemnom parkovisku v Bratislave prinieslo dôležité dáta o teplote a relatívnej vlhkosti vnútorného vzduchu v rôznych zónach parkoviska počas jesene a zimy (od 2. októbra 2023 do 4. februára 2024). Tieto dáta slúžili ako základ pre kalibráciu dynamických simulácií.

Dynamická simulácia s prirodzeným vetraním v softvéri DesignBuilder sa zamerala na najchladnejšie 4 týždne v roku (od 8. januára 2024 do 4. februára 2024). Na základe porovnania simulovaných a nameraných teplôt vnútorného vzduchu bol stanovený priemerný tepelný zisk od jedného auta na 1750 W za prvú hodinu parkovania. Simulácia potvrdila, že pri prirodzenom vetraní teplota vnútorného vzduchu neklesá pod 0 °C pri maximálnej vyťaženosti parkoviska, kedy sa často otvára vstupná a výstupná brána.

Dynamická simulácia s mechanickým vetraním skúmala vplyv troch prevádzkových stavov na teplotu vnútorného vzduchu. Každý prevádzkový stav bol simulovaný s dvomi variantmi vstupného otvoru: brána otvárajúca sa podľa rozvrhu / otvor (bez brány) umožňujúci neustály prívod vzduchu. Výsledky simulácií ukázali, že najvyššie priemerné teploty vnútorného vzduchu boli zaznamenané pri hygienickom vetraní (HYG). Najnižšie teploty boli dosiahnuté pri maximálnom vetraní (MAX). Teplota vnútorného vzduchu neklesla pod 0 °C ani pri maximálnom vetraní a maximálnej vyťaženosti parkoviska.

Softvér DesignBuilder neumožňuje modelovať objemové prietoky vzduchu pre prírodné ventilátory. Tieto prietoky je potrebné regulovať manuálne na základe veľkosti otvoru a stratového súčiniteľa. Do simulácie boli zadane priemerné režimy príchodov a odchodov áut, čo môže vytvárať odchýlky. Bolo použité zjednodušené modelovanie tepelného zisku od áut s použitím jednej priemernej hodnoty. Napriek týmto limitom poskytujú dynamické simulácie cenné informácie o vplyve rôznych prevádzkových stavov na tepelné prostredie v podzemnom parkovisku. Zároveň môžu slúžiť ako nástroj na optimalizáciu jeho návrhu a prevádzky.

V CFD simulácii v softvéri Flovent je možné presne definovať objemové prietoky vzduchu pre každú prírodnú a odvodnú mriežku. Poloha mriežok je presne zachovaná podľa skutočnosti. To umožňuje detailnú simuláciu prúdenia vzduchu a distribúcie teploty v priestore. V dynamickej simulácii v DesignBuilderi nie je možné presne simulovať objemové prietoky vzduchu v prívode a polohu mriežok. To malo za následok rozdiely v teplotách vnútorného vzduchu pri porovnávaní medzi dynamickou a statickou CFD simuláciou. Porovnanie výsledkov dynamickej a statickej CFD simulácie ukázalo, že pri zadaní rovnakých okrajových podmienok sú výsledky porovnateľné a teda statická CFD simulácia poskytla detailný obraz o rozložení CO a teploty v podzemnom parkovisku.

Kvôli náročnosti analýzy typov motorov áut bol zvolený jeden priemerný typ vozidla pre detekciu tepelného zisku. Pre každú podzemnú garáž by teda mal byť špeciálne určený priemerný tepelný zisk z jedného vozidla podľa dĺžky parkovania a predpokladaného účelu a prevádzky budovy.

Pre podrobnejšiu analýzu by bolo vhodné vykonať meranie a porovnať so simuláciou na viacerých podzemných parkoviskách s odlišným počtom podzemných podlaží, rozličným účelom budovy (napr. bytový dom alebo nákupne centrum), iným druhom vetrania, inou geometriou atď. Toto by spresnilo výsledky a na ich základe by sa dali vytvoriť konkrétne usmernenia pri návrhu rôznych typov podzemných parkovísk.

Prechod automobilového priemyslu na koncept elektromobility spôsobí, že vymiznú škodliviny z výfukových plynov áut a teda mechanické vetranie nebude musieť byť tak výkonné. Spaľovací motor, ktorý má priemernú prevádzkovú teplotu 90 °C, bude nahradený batériami, ktoré budú mať tiež určitú prevádzkovú teplotu. V podzemných parkoviskách pribudnú aj nabíjacie stanice, ktoré budú taktiež spôsobovať tepelné zisky.

Prínos pre vedu a prax

Na základe experimentálneho merania a výpočtovej simulácie, práca stanovila priemerný tepelný zisk od jedného auta na 1750 W za prvú hodinu parkovania. Toto zistenie je dôležité pre presnejšie modelovanie teplotných pomerov v podzemných parkoviskách.

Teplota zeminy v simulačnom programe DesignBuilder bola vypočítaná overenou metódou Kiva, ktorá dokáže veľmi presne a rýchlo nasimulovať prenos tepla v podzemných konštrukciách. Tieto okrajové podmienky z dynamickej simulácie boli prenesené do statickej CFD simulácie. Takýto postup by bolo možné využívať aj pri ďalších statických CFD simuláciách.

Bol analyzovaný vplyv rôznych prevádzkových stavov na tepelné prostredie v podzemnom parkovisku s využitím dynamickej simulácie s mechanickým vetraním. Boli simulované rôzne scenáre s rôznou intenzitou vetrania, čo pomôže k výberu optimálneho prevádzkového nastavenia.

Na základe výsledkov dynamickej simulácie s mechanickým vetraním sa stanovila optimálnu skladbu stropu nad nevykurovaným priestorom podzemného parkoviska s ohľadom na dosiahnutie požadovaných tepelno-technických vlastností a minimalizáciu tepelných strát.

Porovnanie statickej CFD simulácie vo Flovente a dynamickej simulácie v DesignBuilderi preukázalo, že pri rovnakých okrajových podmienkach sú výsledky porovnateľné. CFD simulácia však poskytla detailnejší obraz o rozložení CO a teploty v parkovisku, pretože umožňuje presne definovať objemové prietoky vzduchu pre každú vetraciu mriežku. V DesignBuilderi je problematická presná simulácia týchto prietokov, čo viedlo k rozdielom v teplotách.

Literatúra

- [1] AL-TEMEEMI, A.A. - HARRIS, D.J. A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates. In *Energy and Buildings* . 2004. Vol. 36, no. 3, s. 251–260. .
- [2] JIDEFOR, A. Earth Shelters; A Review of Energy Conservation Properties in Earth Sheltered Housing. In ZAIN AHMED, A.Ed. *Energy Conservation* [online]. [s.l.]: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0829-0Dostupné na internete: <<http://www.intechopen.com/books/energy-conservation/earth-shelters-a-review-of-energy-conservation-properties-in-earth-sheltered-housing>>.
- [3] KAŞMER, Ö. et al. Assessments on the stability of natural slopes prone to toe erosion, and man-made historical semi-underground openings carved in soft tuffs at Zelve Open-Air Museum (Cappadocia, Turkey). In *Engineering Geology* . 2013. Vol. 158, s. 135–158. .
- [4] BNKR. In . [online]. Dostupné na internete: <<http://www.bunkerarquitectura.com>>.
- [5] OH, H.-J. et al. Exposure to respirable particles and TVOC in underground parking garages under different types of ventilation and their associated health effects. In *Air Quality, Atmosphere & Health* . 2020. Vol. 13, no. 3, s. 297–308. .
- [6] VAN DRONKELAAR, C. et al. Heating and cooling energy demand in underground buildings: Potential for saving in various climates and functions. In *Energy and Buildings* . 2014. Vol. 71, s. 129–136. .
- [7] HODAS, N. et al. Indoor inhalation intake fractions of fine particulate matter: Review of influencing factors. In *Indoor Air* . 2015. Vol. 26. .
- [8] KRARTI, M. - AYARI, A. CFD analysis of ventilation system performance for enclosed parking garages. In *ASHRAE Transactions* 109(2):455-469 . Kansas City, USA, 2003. .
- [9] AHN, S.-J. et al. Study of Securing Required Ventilation Rates and Improving Mechanical Ventilation Systems for Underground Parking Lots. In *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* . 2016. Vol. 15, no. 3, s. 659–665.
- [10] KHALIL, E.E. et al. Investigation of ventilation system performance of tahreer car park using CFD. In *J. of Energy* . 2015. Vol. 2, no. 2. .
- [11] SUAREZ-BERTOIA, R. et al. Ammonia exhaust emissions from spark ignition vehicles over the New European Driving Cycle. In *Atmospheric Environment* . 2014. Vol. 97, s. 43–53. .
- [12] HASHISH, M. Underground car parking ventilation system. In *SlideShare* [online]. 2018. Dostupné na internete: <<https://www.slideshare.net/MohamedHashish10/underground-car-parking-ventilation-system>>.
- [13] MYJAVEC, P. Optimalizace vzduchotechniky výrobní haly. Diplomová práce. In . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov, 2018. s. 91. .
- [14] LU, S. et al. Numerical Study on Impulse Ventilation for Smoke Control in an Underground Car Park. In *Procedia Engineering* . 2011. Vol. 11, s. 369–378. .
- [15] STRAKOVÁ, Z. - HOJER, O. *Priemyselná vzduchotechnika – prednášky. 1. časť*. . Bratislava: STU, 2016. .
- [16] STRAKOVÁ, Z. et al. *Technické zariadenia budov 3. Vetranie a klimatizácia – cvičenia*. . Bratislava: STU, 2015. 288 s.
- [17] SZÉKYOVÁ, M. et al. *Vetranie a klimatizácia*. . Bratislava: Jaga Group, 2004. 350 s.
- [18] Efektívne vetranie podzemných garáží | ASB.sk. In [online]. [cit. 2024-10-11]. Dostupné na internete: <<https://www.asb.sk/stavebnictvo/technicke-zariadenia-budov/efektivne-vetranie-podzemnych-garazi>>.
- [19] Designing & Implementing Car Park System - Fantech. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.fantech.com.au/FanRange.aspx?AppID=P2&RangeID=2019>>.

- [20] Xella natočila postupy práce so zateplením s izolačnými doskami Multipor | ASB.sk. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.asb.sk/stavebnictvo/xella-natocila-postupy-prace-so-zateplenim-s-izolacnymi-doskami-multipor>>.
- [21] Multipor ocieplenie stropow. In [online]. Dostupné na internete: <https://www.xella.pl/pl_PL/Multipor_ocieplenie_stropow>.
- [22] CLT C1 Thermal | Knauf Insulation. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.knaufinsulation.sk/produkty/clt-c1-thermal>>.
- [23] Izolácia stropov v garáži a pivnici | Urob si sám. In [online]. Dostupné na internete: <<https://urobsisam.zoznam.sk/dom/zateplenie/izolacia-stropov-v-garazi-a-pivnici>>.
- [24] Heraklith je matadorem v deskových materiáloch | Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/2214-heraklithr-je-matador-v-deskovych-materialech>>.
- [25] Knauf Insulation Heraklith® Tektalan A2 SmartTec | Knauf Insulation. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.knaufinsulation.co.uk/products/heraklith-tektalan-a2-smarttec>>.
- [26] PEPPER, I.L. - BRUSSEAU, M.L. Physical-Chemical Characteristics of Soils and the Subsurface. In *Environmental and Pollution Science* [online]. [s.l.]: Elsevier, 2019. s. 9–22. ISBN 978-0-12-814719-1 Dostupné na internete: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128147191000021>>.
- [27] RUSNÁK, A. - KATUNSKÝ, D. Teplotný režim pôdy - podzákladia v rámci interakcie priemyselných výrobných budov a podlažia. In *VIII. Vedecká konferencia s medzinárodnou účasťou*. 2007. .
- [28] LARWA, B. - KUPIEC, K. Study of temperature distribution in the ground. In *Chemical and Process Engineering*. 2023. .
- [29] NAWALANY, G. - SOKOŁOWSKI, P. Building–Soil Thermal Interaction: A Case Study. In *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 15, s. 2922. .
- [30] DUNAJSKÝ, E. Teplota pôdy vo väčších hĺbkach. In . Košice: SHMÚ.
- [31] CHARVÁTOVÁ, P. Matematická simulace průběhu teplot v podzákladi a vytvoření modelu odpovídajícího reálnému stavu. In *Disertační práce*. . Vedoucí práce Ing. Karel Čupr, CSc. vyd.Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství., 2019. s. 169. .
- [32] HO, J.C. et al. A field study on determination of carbon monoxide level and thermal environment in an underground car park. In *Building and Environment*. 2004. Vol. 39, no. 1, s. 67–75. .
- [33] ZHAO, Y. et al. Seasonal variations and exposure levels of carbon monoxide in a naturally ventilated residential underground parking lot. In *Science and Technology for the Built Environment*. 2018. Vol. 24, no. 1, s. 73–82. .
- [34] BARBARESI, A. et al. Underground cellar thermal simulation: Definition of a method for modelling performance assessment based on experimental calibration. In *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 76, s. 363–372. .
- [35] KUSUDA, T. - ACHENBACH, P.R. *Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States*. . [s.l.]: National bureau of standards, 1965. 236 s.
- [36] MAZARRÓN, F.R. et al. An assessment of using ground thermal inertia as passive thermal technique in the wine industry around the world. In *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 33–34, s. 54–61. .
- [37] UNI/TS, 11300 Prestazioni energetiche degli edifici (Building energy performances, Technical Report). In . Miláno: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008. .
- [38] Softvér DesignBuilder. In [online]. Dostupné na internete: <<https://designbuilder.co.uk/>>.

- [39] Softvér EnergyPlus. In [online]. Dostupné na internete: <<https://energyplus.net/>>.
- [40] NGUYEN VAN, T. - DE TROYER, F. New Surrogate Model for Wind Pressure Coefficients in a Schematic Urban Environment with a Regular Pattern. In *Atmosphere* . 2018. Vol. 9, no. 3, s. 113. .
- [41] KRUIS, N. - KRARTI, M. KivaTM: A Numerical Framework for Improving Foundation Heat Transfer Calculations. In *Journal of Building Performance Simulation* . 2015. Vol. 8, no. 6. .
- [42] KRUIS, N. Development and Application of a Numerical Framework for Improving Building Foundation Heat Transfer Calculations. In . [s.l.]: Ph.D. Dissertation, University of Colorado, 2015. .
- [43] WILLIAMS, T. - WILLIAMSON, A. Estimating Water-Table Altitudes for Regional Ground-Water Flow Modeling, U.S. Gulf Coast. In *Ground Water* . 1989. Vol. 27, no. 3. .
- [44] FATNASSI, H. et al. Use of computational fluid dynamic tools to model the coupling of plant canopy activity and climate in greenhouses and closed plant growth systems: A review. In *Biosystems Engineering* . 2023. Vol. 230, s. 388–408. .
- [45] Scope of CFD Analysis: Career and Job Opportunities · CFD Flow Engineering. In [online]. Dostupné na internete: <<https://cfdflowengineering.com/scope-of-cfd-modeling-career-and-job-opportunities/>>.
- [46] Simcenter Flovent User Guide. In . 2021. .
- [47] MARKATOS, N.C. The mathematical modelling of turbulent flows. In *Applied Mathematical Modelling* . 1986. Vol. 10, no. 3, s. 190–220. .
- [48] VERSTEEG, H.K. - MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. . 2. ed., [Nachdr.]. vyd. Harlow: Pearson/Prentice Hall, 2007. 503 s. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [49] AGONAFER, D. et al. The LVEL Turbulence Model for Conjugate Heat Transfer at Low Reynolds Numbers. In *EEP-Vol. 18, Application of CAE/ CAD Electronic Systems* . 1996. .
- [50] CHO, J. et al. A step-by-step numerical method for optimization of mechanical ventilation in deep underground enclosed parking lots: A case-design study. In *Journal of Building Engineering* . 2021. Vol. 42, s. 102799. .
- [51] SITTISAK, P. et al. Enhancement of carbon monoxide removal in an underground car park using ventilation system with single and twin jet fans. In *Tunnelling and Underground Space Technology* . 2020. Vol. 97, s. 103226. .
- [52] AL-WAKED, R. et al. Effects of Cross Level Air Interaction within Multilevel Underground Carparks on Indoor Air Quality. In *Fluids* . 2020. Vol. 5, no. 4, s. 177. .
- [53] AL-WAKED, R. et al. Indoor Air Environment of a Shopping Centre Carpark: CFD Ventilation Study. In *Universal Journal of Mechanical Engineering* . 2017. Vol. 5, no. 4, s. 113–123. .
- [54] ESHACK, A. et al. Monitoring and Simulation of Mechanically Ventilated Underground Car Parks. In *Journal of Thermal Engineering* . 2015. Vol. 1, no. 5, s. 295. .
- [55] AMINIAN, J. et al. The enhancement of pollutant removal in underground enclosed parking lots by reconsideration of the exhaust vent heights. In *Tunnelling and Underground Space Technology* . 2018. Vol. 77, s. 305–313. .
- [56] ASIMAKOPOULOU, E. et al. CO DISPERSION IN A CAR-REPAIR SHOP: AN EXPERIMENTAL AND CFD MODELLING STUDY. In *Indoor and Built Environment* . 2013. Vol. 22, no. 5. .
- [57] ROCK, B.A. Heat Gains from Passenger Vehicles Parked in Residential Attached Garages. In *Journal of Architectural Engineering* . 2017. Vol. 23, no. 3, s. B5017001. .
- [58] WALTON, G.N. Computer programs for simulation of lighting/ HVAC interactions. In *NIST* . Gaithersburg, MD, 1993. .

- [59] FARAJ, J. et al. New system of heat recovery from parked vehicles: Experiments and analysis. In *Case Studies in Thermal Engineering* . 2021. Vol. 28, s. 101573. .
- [60] HAUSTEIN, S. - JENSEN, A.F. Factors of electric vehicle adoption: A comparison of conventional and electric car users based on an extended theory of planned behavior. In *International Journal of Sustainable Transportation* . 2018. Vol. 12, no. 7, s. 484–496. .
- [61] EUROPEAN PARLIAMENT Reducing carbon emissions: EU targets and policies - EU monitor. In . 2023. .
- [62] MAHMOUD, R. et al. Opportunities and Limitations of Building Energy Performance Simulation Tools in the Early Stages of Building Design in the UK. In *Sustainability* . 2020. Vol. 12, no. 22, s. 9702. .
- [63] ROTARIS, L. et al. The slow uptake of electric cars in Italy and Slovenia. Evidence from a stated-preference survey and the role of knowledge and environmental awareness. In *Transportation Research Part A: Policy and Practice* . 2021. Vol. 144, s. 1–18. .
- [64] Systemair IV Jet Fans. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.systemair.com/en/products/fans/jet-fans/iv>>.
- [65] ISOVER TOP V FINAL. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.isover.sk/produkty/isover-top-v-final#documentation>>.
- [66] Knauf Insulation. In [online]. Dostupné na internete: <<https://knauf.com/sk-SK>>.

Normy

- ISO/TR 52019-2: 2017 Energy performance of buildings — Hygrothermal performance of building components and building elements.
- STN 73 0540-2+Z1+Z2: 2019 Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie.
- STN 73 0540-3/Oprava Oa: 2020 Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 3: Vlastnosti prostredia a stavebných výrobkov.
- STN 73 4301: 2021 Bytové budovy.
- STN 73 6058/Zmena b: 1989 Hromadné garáže. Základné ustanovenia.
- STN EN 12831-1: 2019 Energetická hospodárnosť budov. Metóda výpočtu projektovaného tepelného príkonu. Časť 1: Tepelný príkon, Modul M3-3.
- STN EN 13501-1:2019 Klasifikácia požiarnych charakteristík stavebných výrobkov a prvkov stavieb. Časť 1: Klasifikácia využívajúca údaje zo skúšok reakcie na oheň.
- STN EN ISO 10211: 2019 Tepelné mosty v stavebných konštrukciách. Tepelné toky a povrchové teploty. Podrobné výpočty (ISO 10211: 2017).
- STN EN ISO 13370: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti budov. Šírenie tepla zeminou. Výpočtové metódy (ISO 13370: 2017).
- STN EN ISO 13789: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti budov. Merný tepelný tok prechodom tepla a vetraním. Výpočtová metóda (ISO 13789: 2017).
- STN EN ISO 14683: 2019 Tepelné mosty v stavebných konštrukciách. Lineárny stratový súčiniteľ. Zjednodušené metódy a predvolené hodnoty (ISO 14683: 2017).

Publikačná činnosť autora

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

MIŠOVÝCHOVÁ, Eva. CFD simulácia mechanicky vetraného podzemného parkoviska so vzduchovou clonou. In: ŠUHAJDOVÁ, Eva; NOSEK, Jakub. Juniorstav 2023. Brno: ECON publishing, 2023, s. 122--129. ISBN 978-80-86433-80-6.

Publikované články v domácich odborných časopisoch

MIŠOVÝCHOVÁ, Eva. INGELI, Rastislav. BOSÁK, Lukáš. Measurement and dynamic simulation of underground parking garage to examine the indoor air temperature. In: *Slovak Journal of Civil Engineering*. vol. 33, no. 1. Slovak University of Technology, 2025, s. 19--33. ISSN 1210-3896.

MIŠOVÝCHOVÁ, Eva. Porovnanie teploty vnútorného vzduchu a koncentrácie oxidu uhoľnatého v podzemnom parkovisku so vzduchovou clonou a bez nej. In: BISTÁK, Andrej. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2022, s. 348--357. ISBN 978-80-227-5251-0.

MIŠOVÝCHOVÁ, Eva. INGELI, Rastislav. Influence of carbon monoxide concentration and air exchange on temperature in underground parking. *Buildustry*. 2021, 103. s. 103--108.

MIŠOVÝCHOVÁ, Eva. Vplyv vlastností zeminy na tepelné straty cez nevykurované podzemné priestory (suterény). *Buildustry*. 2021. 30. s. 30--34.

MIŠOVÝCHOVÁ, Eva. Vybrané štúdie skúmajúce koncentráciu oxidu uhoľnatého a teplotu vnútorného prostredia v podzemných parkoviskách. In: BISTÁK, Andrej. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 366--373. ISBN 978-80-227-5150-6.

MIŠOVÝCHOVÁ, Eva. Vplyv vybraných faktorov na tepelné straty cez nevykurované podzemné priestory (suterény). In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 394--400. ISBN 978-80-227-5052-3.