

Strategický reporting stavu vozoviek na úrovni cestnej siete, II. časť

Rozborová úloha

Ondrej Svačina

Bratislava, 11/2020

Obsah

1	Úvod.....	4
1.1	Manažérske zhrnutie.....	4
1.2	Cieľ úlohy.....	4
1.3	Vypracovanie úlohy.....	5
1.4	Citačný formát.....	5
1.5	Slovník termínov a skratiek.....	5
2	Spoločenské indikátory v systéme merania výkonu	8
2.1	Úvod	8
2.2	Systém merania výkonu.....	9
2.3	Metriky spoločenských nákladov.....	11
2.4	Odpory proti pohybu vozidla a potrebný výkon.....	12
2.4.1	Odpor vzduchu <i>F_a</i>	13
2.4.2	Odpor proti valeniu <i>F_r</i>	14
2.4.3	Odpor z pozdĺžneho sklonu <i>F_g</i>	16
2.4.4	Odpor zo zotrvačnosti vozidla <i>F_i</i>	17
2.4.5	Odpor pri jazde v oblúku <i>F_c</i>	17
2.5	Prevádzkové náklady vozidiel	18
2.5.1	Spotreba PHM	18
2.5.2	Model spotreby paliva MIRAVEC	26
2.5.3	Spotreba mazív.....	28
2.5.4	Spotreba pneumatík.....	29
2.5.5	Náklady na údržbu a opravu vozidiel.....	34
2.6	Stratové časy	38
2.6.1	Model voľných rýchlostí v HDM-4.....	38
2.6.2	Analýza modelu HDM-4	43
2.6.3	Výpočet nákladov na stratové časy	46
2.7	Emisie	51
2.7.1	Všeobecne o emisiách generovaných cestnou dopravou.....	51
2.7.2	Emisné modely	52
2.7.3	Emisný model HDM-4	52
2.7.4	Analýza emisného modelu HDM-4	54
2.7.5	Ekonomická hodnota emisií	54
2.7.6	Záver	55
2.8	Modely spoločenských indikátorov	56
2.8.1	Návrh možností.....	56
2.8.2	Kalkulácia <i>dUSCS</i> s použitím modelu HDM-4.....	57
2.8.3	Citlivosť metriky <i>dUSCS</i> na IRI.....	58
2.8.4	Citlivosť metriky <i>dUSCS</i> na MPD.....	65
2.9	Analýza údajov o dopravnej intenzite na Slovensku.....	73
2.9.1	Dáta celoštátneho sčítania dopravy	73
2.9.2	Skladba dopravného prúdu	74
2.9.3	Analýza chýbajúcich dát dopravnej intenzity k roku 2020.....	76
2.9.4	Analýza aktuálnosti údajov dopravnej intenzity	77
2.10	Podobné zahraničné modely.....	78

2.11	Záver	79
3	Analýza a technický návrh systému merania výkonu	81
3.1	Procesný návrh	82
3.2	Funkčný návrh	83
3.2.1	Model prípadov použitia	83
3.2.2	Návrh používateľského rozhrania.....	87
3.3	Návrh technickej architektúry	92
3.4	Kľúčové výkonnostné indikátory (KPI) na sieti diaľnic, rýchlostných ciest a ciest I. triedy v SR	93
3.4.1	Úvod	93
3.4.2	Požadované merania a ich frekvencia.....	93
3.4.3	Vstupné dáta.....	96
3.4.4	Odvožené vstupné údaje	103
3.4.5	Definičná množina a kalkulačné dáta	106
3.4.6	Indikátor KPI01 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska pozdĺžnych nerovností	106
3.4.7	Indikátor KPI02 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska hĺbky vyjazdených koľají.....	107
3.4.8	Indikátor KPI03 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska priemernej hĺbky makrotextúry (protišmykové vlastnosti)	108
3.4.9	Indikátor KPI04 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska pozdĺžneho šmykového trenia (protišmykové vlastnosti)	110
3.4.10	Indikátor KPI05 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska únosnosti (štruktúrnej kapacity).....	111
3.5	Zohľadnenie dopravného zaťaženia	111
4	Návrh ďalšieho postupu	113
5	Záver	114
6	Referencie	115

1 Úvod

1.1 Manažérske zhrnutie

Systém hospodárenia s majetkom, v ktorom sa synergicky stretávajú procesy, nástroje a metodiky s cieľom efektívneho plánovania údržby, opráv a rekonštrukcií, sa dnes považuje za samozrejmú. Zavedenie a dôsledné dodržiavanie týchto princípov je z veľkej časti na zodpovednosti a internej organizácii správcu cestnej siete.

Efektivitu hospodárenia s cestnou sieťou každého správcu ciest je však potrebné a nevyhnutné merať externe viditeľnými metrikami. Keďže cestná infraštruktúra patrí medzi dôležitý kľúčový infraštruktúrny prvok v štáte, ktorý sa financuje netriviálne veľkým objemom verejných prostriedkov, je aj vo verejnom záujme vyhodnocovať a sledovať konkrétne hmatateľné výsledky každoročnej činnosti správcov ciest z pohľadu zmeny stavu cestnej siete k lepšiemu.

Na tento účel sa definujú špeciálne metriky, ktorým sa priradí cieľová hodnota a nazývajú sa kľúčové výkonnostné indikátory (skrátene KPI). Okrem toho, že umožňujú merať efektivitu zavedeného systému hospodárenia s majetkom daného správcu ciest, umožňujú aj posudzovať a vyhodnocovať činnosti správcu v súvislosti s plnením zadefinovaných cieľov, následne vhodne nasmerovať rozhodovacie procesy k ich naplneniu a aj porovnávať dosahovaný výkon medzi jednotlivými správcami.

Veľmi dôležité je, že zavedenie takýchto KPI predstavuje prechod od tradičného reaktívneho a pasívneho riadenia k proaktívnemu riadeniu založeného na výkone, ktorý môže byť súčasťou kontraktu medzi riadiacim strategickým orgánom (ministerstvo dopravy, vlastník ciest) a výkonnou zložkou (správcovia ciest).

Na rutinné vyhodnotenie KPI je potrebné zaviesť tzv. systém monitorovania výkonu (SMV). V ňom sú exaktne zadefinované KPI a spôsob ich vyhodnotenia.

Táto rozborová úloha detailne popisuje štyri KPI, ktoré sa zavedú na Slovensku ako prvé na sieti diaľnic, rýchlostných ciest a ciest I. triedy. Popisuje ďalej návrh sprievodného informačného systému monitorovania výkonu tak, aby v ďalšom kroku mohlo byť prístupné k jeho implementácii.

Navrhnuté štyri KPI hodnotia stav vozoviek z troch parciálnych aspektov (pozdĺžna nerovnosť, vyjazdené koľaje a protišmykové vlastnosti), z ktorých každý nejakou mierou reflektuje naplnenie kľúčových a strategických cieľov, ako je bezpečnosť cestnej premávky, zvyšovanie komfortu jazdy vodičov a plynulosti cestnej premávky, znižovanie objemu exhalovaných látok znečisťujúcich ovzdušie a skleníkových plynov a podobne.

Rozoberá tiež možnosť zavedenia jedného unifikujúceho KPI hodnotiaceho stav vozoviek komplexne vzhľadom na prevádzkové náklady vozidiel, stratové časy vodičov a prepravovaného nákladu a emisií.

1.2 Cieľ úlohy

Rozborová úloha je pokračovanie RÚ „Strategický reporting stavu vozoviek na úrovni cestnej siete – I. časť“, ktorá bola vypracovaná na základe objednávky SSC a odovzdaná v roku 2019. Ide o pokračovanie v zmysle záverov uvedených v I. časti RÚ, kapitole 6 „Návrh ďalšieho postupu“.

Meranie výkonu je dôležitá oblasť strategického riadenia cestného hospodárstva. Prostredníctvom dohodnutej množiny kľúčových výkonnostných indikátorov (KPI), vyhodnocovaných v systéme merania výkonu, umožňuje vyhodnocovanie plnenia strategických cieľov, tieto ciele ďalej formovať alebo aktualizovať, riadiť činnosti správy a údržby ciest v súlade s týmito cieľmi, ako aj porovnávať výsledky a efektivitu medzi jednotlivými správcami vzájomne.

Pokračovanie RÚ je zamerané na analýzu a návrh prvej verzie systému merania výkonu z pohľadu informačných technológií a na rozbor aplikovateľných spoločenských indikátorov, ktoré umožňujú hodnotiť kvalitu cestnej siete komplexne z hľadiska jej vplyvu na vodičov a celkove na spoločnosť.

Úloha zahŕňa:

1. vypracovanie analýzy a technického návrhu systému merania výkonu
 - a. funkčný návrh (model prípadov použitia, návrh používateľského rozhrania – drôtený model),
 - b. technická architektúra, komponentový model, dátový model a model toku dát,
 - c. popis algoritmov, vývojový diagram,
2. rozbor aplikovateľnosti spoločenských indikátorov na hodnotenie kvality cestnej siete
 - a. prehľad aplikovateľných modelov výpočtu spoločenských metrík ako podkladových vstupov pre kľúčové výkonnostné indikátory, primárne prevádzkových nákladov vozidiel, stratových časov a emisií,
 - b. vplyv vstupných dát na stabilitu indikátorov (analýza citlivosti) – miera zmeny vypočítaných hodnôt indikátorov kvality cestnej siete pri zmene technického stavu vozovky vyjadreného premennými technickými parametrami a pri zmene intenzít dopravy,
 - c. návrh KPI zo spoločenských metrík (primárne prevádzkových nákladov vozidiel, stratových časov a emisií a ich kombinácie), analýza použitia podobných KPI v zahraničí.

1.3 Vypracovanie úlohy

Túto rozborovú úlohu na základe objednávky Slovenskej správy ciest (SSC) vypracoval Mgr. Ondrej Svačina, spoločnosť Softec, spol. s r.o., ondrejsv@ondrejsv.com, ondrej.svacina@softec.sk.

1.4 Citačný formát

Túto prácu citujte ako:

Ondrej Svačina, Strategický reporting stavu vozoviek na úrovni cestnej siete, II. časť. Bratislava: Slovenská správa ciest, 2020.

1.5 Slovník termínov a skratiek

Termín / skratka	Význam
AADT	Average Annual Daily Traffic – angl. značka pre RPDl
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials – Americká asociácia predstaviteľov štátnych ciest a dopravy. Mimovládna organizácia publikujúca špecifikácie, normy, testovacie protokoly a pod. so sídlom vo Washingtone, D.C.
AMS	Asset Management System – systém hospodárenia s majetkom
BCI	base curvature index – index krivosti podkladu
CEDR	organizácia združujúca národných správcov ciest v Európe s cieľom vzájomného zdieľania znalostí a najlepšej praxe a spolupráce a zdieľania zdrojov na spoločných projektoch.
CTEPK	Centrálna technická evidencia pozemných komunikácií

<i>dSC</i>	Metrika pre KPI navýšených (marginálnych) spoločenských nákladov zo zlého technického stavu vozoviek.
<i>dUSC_S</i>	Metrika pre navýšené (marginálne) jednotkové spoločenské náklady zo zlého technického stavu vozovky na danom úseku <i>S</i> .
ECPRD	Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation (2007 – 2009) [Šetrenie energie pri návrhu, údržbe a prevádzke ciest]. Európsky medzinárodný projekt s cieľom vyvinúť model a nástroje na optimalizáciu trasovania ciest s cieľom minimalizácie spotrebovanej energie pri výstavbe a 20 ročnej prevádzke.
<i>E_{ekv}</i>	ekvivalentný modul pružnosti konštrukcie vozovky
EVA	Effekter vid väganalyser [Účinky v analýze ciest] je kalkulačný model a nástroj pre vyhodnotenie účinkov a výpočtu profitability projektov v cestnej infraštruktúre. Vyvinutý Švédskym národným inštitútom pre cestný a dopravný výskum (VTI).
ESAL	Estimated Single-Axle Load – odhadované zaťaženie jednou nápravou; bez bližšieho určenia ide o počet opakovaní zaťaženia americkou návrhovou nápravou 80 kN (18 kpi).
FHWA	Federal Highway Administration – Správa federálnych ciest, USA. Divízia Ministerstva dopravy USA.
FWD	Falling Weight Deflectometer – deflektometer s padajúcim závažím; prístroj na meranie priehybov vozovky pod pulznou záťažou.
GPR	Ground penetrating radar – georadar.
IRI	International Roughness Index – medzinárodný index nerovnosti. Technický index pre vyjadrenie miery pozdĺžnej nerovnosti.
<i>j_v</i>	jednotkové vozidlo; v kontexte HDM-4 modelu ide PCSE, t.j. priestorový ekvivalent osobného vozidla
KPI	key performance indicator – kľúčový indikátor výkonu
MDV SR	Ministerstvo dopravy a výstavby SR, ako aj jeho predchádzajúce názvy podľa zákona č. 575/2001 Z.z. o organizácii činnosti vlády a organizácii ústrednej štátnej správy
MIRAVEC	Modelling Infrastructure influence on Road Vehicle Energy Consumption [Modelovanie vplyvu infraštruktúry na energetickú spotrebu cestných vozidiel]. Medzinárodný európsky projekt zastrešený organizáciou CEDR v programe ERA-NET, prebiehal medzi 11/2011 – 10/2013. Cieľom bolo analyzovať rozličné charakteristiky cestnej infraštruktúry, ktoré majú vplyv na spotrebu energie cestných vozidiel.
MIRIAM	Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems [Modely pre valivý odpor v systémoch hospodárenia s cestnou infraštruktúrou]. Medzinárodný európsky projekt s cieľom analyzovať vplyvy valivého odporu predovšetkým na objem emitovaného CO ₂ a pripraviť modely na jeho kvantifikáciu.
MPD	mean profile depth – priemerná hĺbka profilu; parameter makrotextúry povrchu vozovky
<i>Mu</i>	koeficient pozdĺžneho trenia meraný zariadením Skiddometer BV11
NDS	Národná diaľničná spoločnosť, a.s.
NS	návesová súprava
NV	nákladné vozidlo
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses; v súčasnosti Svetová cestná asociácia (World Road Association). Medzinárodné fórum pre diskusiu rôznych aspektov ciest a cestných sietí.
PHM	pohonné hmoty

PM2.5	jemné tuhé látky o priemere menšom ako 2,5 µm
PM10	jemné tuhé látky o priemere menšom ako 10 µm
PMS	Pavement Management System – systém hospodárenia s vozovkami
PSI	Present Serviceability Index – index prevádzkovej funkčnosti (spôsobilosti) zavedený v rámci výskumu AASHTO v 50.-60. rokoch minulého storočia
psi	pound per square inch (libra sily na palec štvorcový), anglosaská jednotka tlaku a mechanického napätia; 1 psi ≈ 6 894,76 Pa.
PTP	premenný technický parameter alebo premenné technické parametre
R alebo RUT	hlbka vyjazdenej koľaje
RUC	Road User Costs – náklady používateľov ciest
rehabilitácia	súhrnné označenie niektorej z metód údržby, opravy alebo rekonštrukcie vozoviek
roughness	pozdĺžne nerovnosti vozoviek s vlnovou dĺžkou 5 – 50 m
RPDI	ročný priemer denných intenzít [voz/deň]
rutting	vyjazdené koľaje alebo hĺbka vyjazdených koľají (podľa kontextu)
SCI	1. surface curvature index – index krivosti povrchu, 2. structural condition index – index štruktúrneho stavu
SHV	systém hospodárenia s vozovkami
SMV	systém merania výkonu
SRI	skid resistance index – index šmykového odporu
SSC	Slovenská správa ciest
TRRL	Transport and Roads Research Laboratory (laboratórium pre výskum dopravy a ciest); pôvodný názov dnešnej firmy TRL, Ltd. Britská konzultačná a výskumná spoločnosť, privatizovaná v r. 1996.
TSD	Traffic Speed Deflectometer – deflektometer o cestovnej rýchlosti. Zariadenie pre kontinuálne meranie priehybovej charakteristiky vozoviek pri bežnej cestovnej rýchlosti.
UCI	unified crack index – unifikovaný index trhlín
ÚOR	údržba, oprava a (alebo) rekonštrukcia
VETO	Švédsky mechanistický model pre výpočet prevádzkových nákladov vozidiel. Vyvinutý Švédskym národným inštitútom pre cestný a dopravný výskum (VTI).
VOC	Vehicle Operating Costs – prevádzkové náklady vozidiel

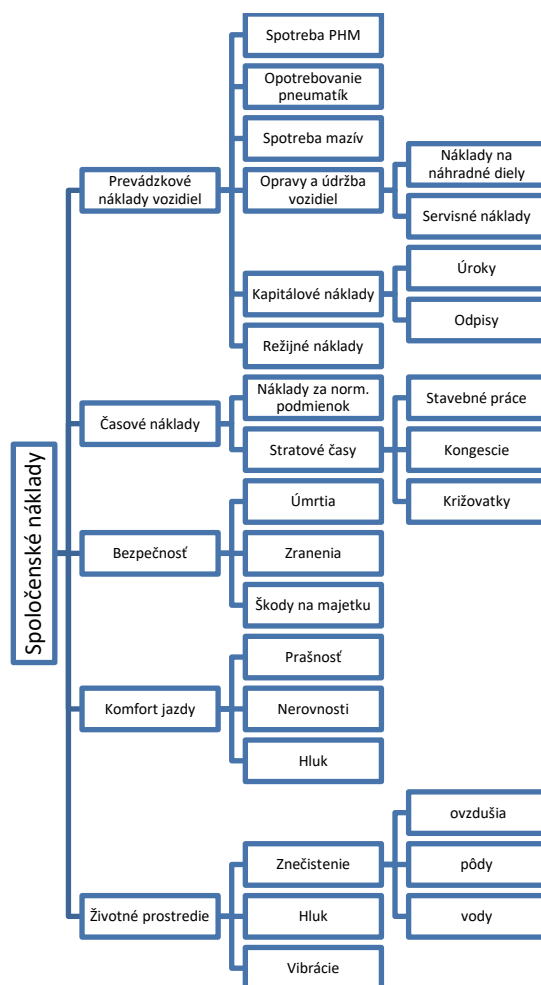
2 Spoločenské indikátory v systéme merania výkonu

2.1 Úvod

Spoločenské náklady prevádzky vozidiel (ďalej len „spoločenské náklady“) predstavujú všetky náklady, ktoré spoločnosť znáša so samotnou prevádzkou vozidiel. Budeme sem počítať tak interné náklady systému, teda náklady, ktoré priamo platia používatelia ciest, ako aj externé náklady (externality), t.j. náklady, ktoré znášajú iné subjekty ako používatelia ciest.

Typickými internými nákladmi sú prevádzkové náklady vozidiel a časové náklady vodičov a cestujúcich. Typické externé náklady sú náklady z následkov emisií exhalovaných do ovzdušia. Niektoré náklady môžu mať zmiešanú povahu, teda časť z nich je interným nákladom a časť je externalizovaná (napr. náklady z dopravných nehôd, náklady z emitovaného hluku).

Je zrejmé, že celkové spoločenské náklady sú tvorené súčtom mnohým parciálnych nákladov. Jeden z možných výpočtov takýchto čiastkových nákladov a ich kategorizáciu znázorňuje nasledovný obrázok:



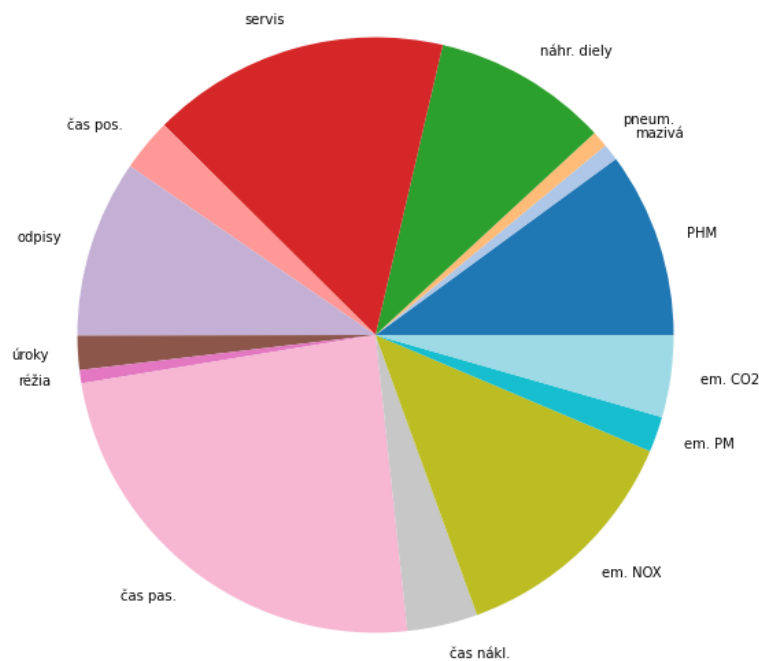
Obrázok 1 Čiastkové náklady prevádzky vozidiel a ich kategorizácia

Z povahy týchto veličín vidno, že ich primárne vyčíslenie vo forme metriky má rôzne fyzikálne jednotky, napr. spotreba PHM býva udávaná v l/100/km, emisie CO₂ v g/km, náklady na náhradné diely ako % z ceny nového vozidla na 1000 km.

Aby bolo možné vytvoriť metriku kombinujúcu tieto parciálne náklady a aby bolo možné porovnávať ich vzájomný vplyv, je nevyhnutné ich previesť na spoločné jednotky, čo sa robí najčastejšie priradením váh alebo prevedením na peňažné jednotky. Pri metóde váženía je potrebné stanoviť váhy jednotlivých zložiek, na čo existuje viacero metód. Prevedenie na peňažné jednotky vyžaduje stanovenie jednotkových cien zložiek¹, napr. ceny PHM za 1 liter, ceny za škody spôsobené emitovaním 1 kg CO₂ a pod.

Keďže pre viacero parciálnych zložiek spoločenských nákladov sú stanovené ekonomické jednotkové ceny či už na úrovni EÚ alebo národnej úrovni alebo je možné ich stanoviť, budeme ďalej pracovať pri úvahách o kombinovaných spoločenských nákladov práve s týmto spôsobom.

Pre ilustráciu je uvedený rozpad nákladov v modeli HDM-4 na 1000 voz.km premávky na relatívne rovnom úseku cesty s vozovkou vo veľmi dobrom stave pri maximálnej povolenej rýchlosti 100 km/h s cca 80 % podielom osobných motorových vozidiel po prevode parciálnych nákladov na ekonomické náklady (€/1000/voz/km):



Obrázok 2 Príklad rozpadu spoločenských nákladov na vybranom úseku cesty v modeli HDM-4

2.2 Systém merania výkonu

Systém merania výkonu (SMV) a súvisiace definície boli podrobne rozobraté v predchádzajúcej časti RÚ [1]; v tejto kapitole sa nachádza len základné zopakovanie kvôli nadviazaniu kontextu.

Systém merania výkonu (SMV; angl. performance monitoring system) je množina procesov, metodík a nástrojov na meranie výkonu procesov organizácií.

Umožňuje:

1. merať efektivitu systému hospodárenia s majetkom a organizácie ako takej,

¹ V zásade je to len špecifická metóda priradenia váh. Z dôvodu jej významu a odlišného stanovenia váh od ostatných metód ju priznávame ako samostatnú metódu.

2. posudzovať a vyhodnocovať dosiahnuté ciele v súvislosti s plnením zadefinovaných cieľov,
3. smerovať rozhodovacie procesy k naplneniu cieľov a zámerov,
4. porovnávať dosahovaný výkon medzi jednotlivými organizáciami.

Meranie výkonu je realizované typicky formou tzv. *výkonnostných indikátorov* (indikátorov výkonu), čo sú dobre zadefinované veličiny odvodené z merateľných údajov vyjadrujúce mieru úspešnosti organizácie alebo nejakého procesu pri plnení cieľov. Nevyhnutná súčasť výkonnostného indikátora je cieľová hodnota alebo minimálne cieľový trend, pokiaľ nie je možné stanoviť cieľovú hodnotu.

Výkonnostné indikátory sú *nutne zviazané s cieľmi a zámermi*. Priamo alebo nepriamo indikujú, či boli naplnené alebo či organizácia alebo proces sú na ceste k ich naplneniu. Formujú plány, zoznamy úloh a ich implementačné procesy tak, aby viedli k plneniu cieľov a zámerov. Poskytujú po implementácii potrebnú spätnú väzbu pre manažment. Súčasne spätne môžu ovplyvňovať ciele a zábery – ich reformulácia alebo úprava môže byť potrebná, pokiaľ sa ich nedarí naplňať alebo naopak, boli splnené napríklad predčasne.

Pohľad na výkonnostné indikátory umožňuje organizácii sledovať, v akom stave sa nachádza. Súčasne poskytuje transparentný pohľad do verejných organizácií, ako sa investície vo forme verejných prostriedkov pretavujú do vylepšenia infraštruktúry a spoločnosti ako celku.

Systém merania výkonu a výkonnostné indikátory poskytujú aj vhodnú *formu jednotného komunikačného jazyka* medzi rôznymi aktérmi – od cestmajstrov, technikov, manažment až po vlastníkov, dohľadové orgány a verejnosť. Všetci účastníci vzťahov v cestnom hospodárstve môžu porozumieť procesom a dosahovaným výsledkom pri správe ciest práve formou výkonnostných indikátorov.

Ďalej sa budeme v texte zaoberať výlučne systémami merania výkonu orientovanými na stav *cestných vozoviek*.

Dôležitá súčasť systému merania výkonu je pravidelné vyhodnocovanie indikátorov a ich reportovanie, ktoré sa realizuje kvôli:

- mechanizmu spätnej väzby pre interný manažment správcov ciest,
- hodnoteniu práce manažmentu a pracovníkov v systémoch riadenia orientovanom na výsledky a výkon (angl. performance oriented management, management by goals),
- vyhodnoteniu efektívnosti spotreby verejných prostriedkov,
- reportovaniu stavu cestnej siete vlastníkom a nadriadeným organizáciám (ministerstvo dopravy, vláda SR, NR SR),
- reportovaniu verejnosti zrozumiteľné informácie o stave ciest v záujme transparentnosti.

Miera (angl. measure) je priamo meraná veličina v objektívnej realite. V SHV má typicky formu tzv. *technického parametra* – veličiny vyjadrujúcej fyzickú charakteristiku vozovky, meranej diagnostickými zariadeniami alebo pozorovaním.

Metrika (angl. metric) je veličina odvodená z miery alebo mier, v ideálnom prípade explicitnými vzorcom. Metrika môže byť vyjadrená vo forme **indexu**, teda bezrozmernej veličiny.

Indikátor (ukazovateľ) je metrika vytvorená za účelom pravidelného vyhodnocovania a sledovania jej hodnôt. Má určenú cieľovú hodnotu alebo aspoň želaný trend. Výkonnostný index je indikátor vo forme indexu.

Výkonnostný indikátor je indikátor vytvorený pre sledovanie výkonu procesu alebo organizačnej jednotky.

Kľúčový výkonnostný indikátor (KPI) je výkonnostný indikátor, ktorý bol vytvorený pre sledovanie výkonu kľúčových procesov alebo je kľúčovým (rozhodujúcim) pre sledovanie výkonu procesov alebo organizačnej jednotky.

Na jednotlivé výkonnostné indikátory kladieme isté požiadavky v záujme dosiahnutia požadovanej kvality SMV. Základné požiadavky sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

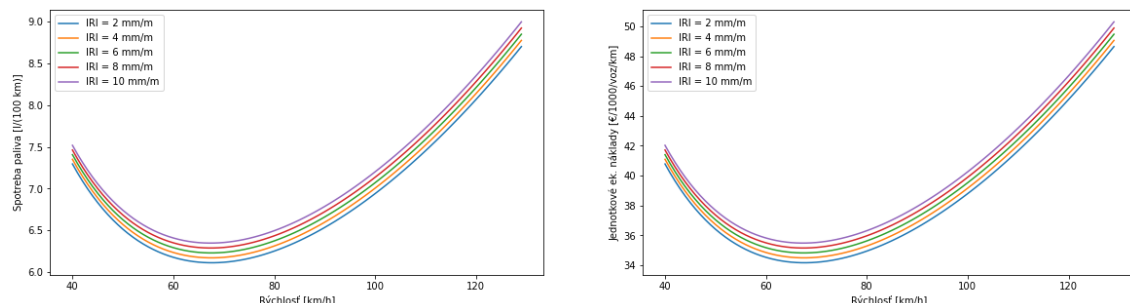
Požiadavka	Popis
relevantné	Ukazovateľ musí byť spojený s definovanými cieľmi a zámermi.
jasne definované	Ukazovateľ musí mať jasný predpis na výpočet jeho hodnoty.
opakovateľné	Opakované vyhodnotenie ukazovateľa pri nezmenených vstupných podmienkach musí vracať rovnakú hodnotu.
ekonomicky efektívne	Náklady na vyhodnotenie ukazovateľa musia byť ekonomicky opodstatnené vo vzťahu k jeho prínosom.
časovo dostupné	Vyhodnotenie ukazovateľa nesmie presiahnuť časový rámec užitočnosti jeho hodnoty.
ovplyvniteľné	Sledovaná organizácia musí byť schopná svojou vlastnou činnosťou ovplyvniť hodnotu ukazovateľa.
konzistentné	Ukazovatele musia byť vzájomne konzistentné, tzn. neodporujúce si a ideálne neprekrývajúce sa a doplňujúce sa.
predpovedateľné	Hodnoty ukazovateľov je možné predpovedať v dohľadnej budúcnosti podľa potreby. Splnenie tejto požiadavky je vhodné, avšak nie nevyhnutné.

2.3 Metriky spoločenských nákladov

V súlade s atribútmi kvality výkonnostných indikátorov popísaných v predchádzajúcej kapitole, hľadáme vhodné indikátory odvodené z metrick spoločenských nákladov prevádzky motorových vozidiel na pozemných komunikáciách.

Pre naplnenie požiadavky ovplyvniteľnosti v SMV vozoviek budeme hľadať predovšetkým také indikátory, na ktoré majú správcovia ciest dosah pri manažmente premenných technických parametrov vozoviek.

Príkladom takejto parciálnej metriky je spotreba pohonných hmôt osobného motorového vozidla v modeli HDM-4, ktorá je citlivá na hodnoty IRI, ako ukazuje nasledujúci obrázok:



Obrázok 3 Spotreba paliva osobného motorového vozidla a zodpovedajúce ekonomické náklady na rovnom úseku pre rôzne hodnoty pozdĺžnej nerovnosti vyjadrené cez IRI

Znamená to, že správca vhodnou intervenciou v rámci manažmentu premenných technických parametrov vozoviek (PTP) môže ovplyvňovať do určitej miery spotrebu PHM vozidiel.

V tejto RÚ budeme v súlade so zadáním ďalej analyzovať metriky odvodené z týchto parciálnych nákladov:

- prevádzkové náklady vozidiel,
- stratové časy,
- emisie.

Prevádzkové náklady vozidiel (ang. „vehicle operating costs“, skr. VOC) pozostávajú z priamych nákladov vlastníctva alebo držby a prevádzky jednotlivého vozidla. Je zrejmé, že ich rozklad závisí od typu analyzovaného vozidla. Pre konvenčné vozidlá s klasickými spaľovacími motormi ide o náklady na:

1. spotrebu pohonných hmôt (PHM),
2. spotrebu mazív (motorových olejov),
3. opotrebovanie pneumatík,
4. údržbu a opravy vozidiel (vrátane nákladov na náhradné diely),
5. kapitálové náklady (odpisy, úroky).

Stratové časy sú dodatočné náklady spôsobené zdržaním spôsobeným zlým technickým stavom vozovky.

Emisné náklady predstavujú škodové externality spôsobené exhalovanými látkami znečisťujúcimi ovzdušie a látkami antropogénne zosilňujúcimi skleníkový efekt.

Metriky prevádzkových nákladov vozidiel a emisií môžeme definovať buď:

- absolútne ako reálnu výšku týchto nákladov alebo
- relatívne ako dodatočné náklady v porovnaní s vozovkou vo výbornom stave, resp. v stave s minimálnymi nákladmi.

Stratové časy sú zo svojej definície relatívne.

Relatívny náklad je teda:

$$dC_{x,s} = C_{x,s} - C_{x,0}$$

kde $C_{x,s}$ sú náklady typu x pri vyšetřovanom stave vozovky s a $C_{x,0}$ sú náklady typu x na vozovke vo výbornom technickom stave, resp. v technickom stave s minimálnymi nákladmi typu x .

Technický stav vozovky vyjadrujeme podľa zvyklostí premennými technickými parametrami prevádzkovej spôsobilosti a výkonnosti.

Celkové **spoločenské náklady** sú súčtom všetkých analyzovaných parciálnych nákladov. Na definíciu celkovej metriky a na nej založeného indikátora je teda potrebné zdefinovať metriky parciálnych nákladov, čo bude predmetom ďalších kapitol.

2.4 Odpory proti pohybu vozidla a potrebný výkon

Na vozidlo v reálnych podmienkach pôsobí v každom momente jedna alebo viacero síl, ktoré bránia jeho pohybu – odporové sily proti pohybu vozidla. Udržanie vozidla v pohybe znamená potrebu tieto sily prekonať inou silou, ktorou je trakčná sila motora (a pri jazde zo svahu gravitačná sila).

Kedže:

1. spotreba paliva je funkciou okamžitého výkonu motora, a ten je funkciou veľkosti okamžitých odporových síl proti pohybu,
2. objem emisií je funkciou spáleného paliva,
3. niektoré aspekty aktuálnej rýchlosti vozidiel závisia od veľkosti odporových síl proti pohybu vozidla, čo má priamy vplyv na stratové časy a opätovne spotrebu paliva,

je potrebné, sa de facto v každom modeli prevádzkových nákladov vozidiel, stratových časov a objemu emisií zaoberať kalkuláciou týchto odporových síl.

Ide o tieto sily [2], [3], [4], [5]:

1. odpor vzduchu F_a ,
2. odpor proti valeniu F_r ,
3. odpor z pozdĺžneho sklonu F_g ,
4. odpor zo zotrvačnosti vozidla F_i ,
5. odpor pri jazde v oblúku F_c (kombinujúci odpory z priečného sklonu a dostredivej sily).

Pre priemerný potrebný trakčný (ťažný) výkon P vozidla potom platí:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = F \cdot v$$

kde:

F je veľkosť výslednice síl pôsobiacich proti pohybu vozidla ($F = F_a + F_r + F_g + F_i + F_c$) [N],

v je priemerná rýchlosť vozidla [m/s].

Celkový požadovaný výkon od motora bude potrebný trakčný výkon navýšený o zložky na prekonanie vnútorných odporov motora, prevodovky a hnacieho ústrojenstva² a výkon potrebný na beh príslušenstva.

V nasledujúcich kapitolách uvádzame základný prehľad modelovania jednotlivých odporových síl.

2.4.1 Odpor vzduchu F_a

Všeobecne modelujeme odpor vzduchu odvodením z Bernoulliho rovnice a má tvar:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

kde:

C_d je koeficient odporu vzduchu pri pohybe vozidla v ňom; závisí hlavne od tvaru vozidla a jeho aerodynamických vlastností,³

A je čelná plocha vozidla [m²],⁴

² diferenciál, ložiská kolies a trenie neaplikovaného brzdneho systému; spolu okolo 50 N. [10]

³ osobné vozidlá medzi 0,28 – 0,35 [10]; aerodynamicky úsporné osobné vozidlá až po 0,18; najnižšia hodnota u sériovo vyrábaných osobných vozidlách je 0,22 (Mercedes-Benz CLA a trieda S V223; rok 2020); nákladné vozidlá medzi 0,5 – 1,5 [10]; autobusy medzi 0,6 – 0,7 [10].

⁴ osobné vozidlá okolo 2 m², nákladné okolo 9 m². [10]

ρ je hustota vzduchu [kg/m^3],⁵

v je relatívna rýchlosť vozidla voči vzduchu (t.j. súčet rýchlosti vozidla a rýchlosti vetra v zložke proti smeru jazdy vozidla) [m/s].

Vidíme, že odpor vzduchu rastie so štvorcom rýchlosti vozidla (potrebný výkon na jeho prekonanie tak rastie s treťou mocninou rýchlosti vozidla) a je priamo úmerný jeho čelnej ploche.

Celkovo má správca na veľkosť F_a len veľmi malý vplyv, môže ju ako-tak ovplyvňovať znižovaním rýchlosti pôsobiaceho vetra (protihlukové steny, stromové aleje, vhodné vedenie trasy popri bočných prekážkach a pod.). Pri manažmente PTP však nemá na ňu žiaden vplyv.

2.4.2 Odpor proti valeniu F_r

Odpor proti valeniu (aj „valivý odpor“) počítame ako:

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g$$

kde:

C_r je koeficient valivého odporu,

m je hmotnosť vozidla [kg],

g je tiažové zrýchlenie [m/s^2].

Odpor proti valeniu je v konvenčných vozidlách so vzduchovými pneumatikami spôsobený takmer výlučne deformáciami pneumatík (energia spotrebovaná na pružnú deformáciu pneumatiky je väčšia ako energia, ktorú pneumatika vráti späť po návrate do pôvodného tvaru; zvyšková energia sa mení na teplo).⁶

Vo všeobecnosti je valivý odpor komplexný fenomén pozostávajúci z mnohých zložiek. Väčšina z týchto zložiek má podstatu energetických strát, a preto sa modelujú vyčísľovaním straty energie na jednotku dĺžky, čím sa počíta zdanlivá sila pôsobiaca proti smeru valenia kolesa ($\frac{J}{m} = \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{m}} = \text{N}$ v analýze jednotiek). Valivý odpor ako stratu energie na jednotku dĺžky definujú aj súčasné normy (ISO 28580:2009 a SAE J2452).

Typické veľkosti pre nové pneumatiky na osobných vozidlách sú v intervale 0,006 – 0,015 a 0,004 – 0,012 pre ťažké nákladné vozidlá. [6]

Pri modelovaní nás zaujíma teda hlavne vyčíslenie súčiniteľa C_r . Pri pohybe konvenčného vozidla so vzduchom plnenými pneumatikami jeho veľkosť závisí od tlaku hustenia pneumatík, rýchlosti vozidla, vlastností pneumatík a povrchových vlastností vozovky.

Priame meranie koeficientu valivého trenia C_r je možné v laboratórnych podmienkach (pohyb testovacej pneumatiky voči oceľovému bubnu alternatívne potiahnutom brúsnym papierom – metodiky podľa ISO a SAE) alebo v teréne. Vzhľadom na množstvo faktorov ovplyvňujúcich veľkosť C_r , ktoré sú v laboratóriu len ťažko dosiahnuteľné, sú testy v laboratóriu skôr vhodné na testovanie samotných pneumatík. Vyčíslenie C_r so zohľadnením komplexnej interakcie pneumatiky a vozovky je možné len meraním v teréne, na čo sa používajú dve hlavné metódy: meranie síl alebo momentov na prívесе

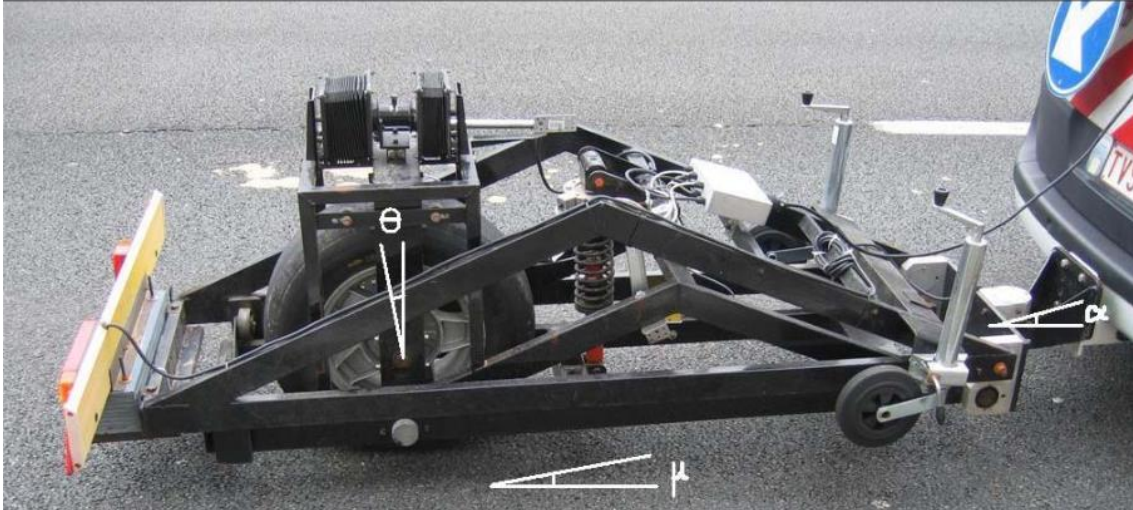
⁵ okolo 1,3 kg/m^3

⁶ tieto hysterézne straty visko-elastického materiálu gumových pneumatík predstavujú približne 90 % zložky súčiniteľa valivého odporu [10], zvyšné zložky sú hlavne kvôli mikrošmyku medzi vozovkou a pneumatikou (2 – 10 %) a odporu vzduchu (1,5 – 3,5 %). [47] Pri komplexnom modelovaní odporov proti pohybu vozidla sa odpor vzduchu počíta zvyčajne celkovo pre vozidlo (F_a) a nevyčísľuje zvlášť pri valivom odpore.

s testovacou pneumatikou alebo meranie spomalenia vozidla po vypnutí motora (tzv. coast-down režim). Na sieťovej úrovni by boli vhodné len merania ťahanými prívesmi.

Na obrázku nižšie je belgické zariadenie. Odpor proti valeniu v smere proti pohybu prívesu spôsobuje vychýlenie testovacej pneumatiky o uhol θ . Potom $C_r = \frac{F_r}{F_z} = \tan \theta$. Ostatné merané uhly α a μ slúžia na lineárne korekcie s empiricky určenými koeficientami.

Týchto zariadení je však málo, majú zatiaľ isté problémy s reprodukovateľnosťou meraní a neexistujú ani žiadne štandardy pre metodiku takýchto meraní [7], [6].



Obrázok 4 Testovací príves pre meranie koeficientu valivého odporu Belgického centra výskumu ciest (BRRC) s náčrtom troch meraných uhlov (reprofoto [6]).

Alternatívny prístup spočíva vo vytvorení modelu koeficientu valivého odporu z iných technických parametrov vozovky, ktoré sa bežne merajú. Tento prístup sa zatiaľ ukazuje ako prakticky najvhodnejší na manažment koeficientu valivého odporu v systémoch hospodárenia s vozovkami.

Z povrchových vlastností vozoviek je známe, že na veľkosť C_r vplyvajú zložky textúry od makrotextúry od vlnovej dĺžky cca 5 mm, cez megatextúru až po pozdĺžne nerovnosti. Textúra vozovky tak vytvára lokálne priehyby pneumatiky spôsobujúce ďalšie hysterézne energetické straty nad rámec bežnej deformácie. Mikrotextúra spôsobuje aj mikrotrecie efekty medzi pneumatikou a vozovkou.

Priehyb pod ťažkými vozidlami na netuhých vozovkách môže mať tiež vplyv na C_r (deformácia pneumatiky pri priehybe vozovky je menšia, zároveň sa tvoria mikrovlnky pred pneumatikou ako na netuhej podložke).

Vyjazdené koľaje môžu spôsobovať vznik bočných síl, ktorých účinok sa prejaví vo väčších stratách.

Koeficient C_r rastie aj s rýchlosťou, závislosť na ktorej sa vyjadruje vo všeobecnosti ako [8]:

$$C_r = C_0 + C_n \cdot V^n$$

kde C_0 je statická zložka koeficientu valivého odporu, C_n je jeho dynamická zložka a n je exponent, ktorý býva 1 (lineárny model) alebo 2 (kvadratický model) alebo kombinovaný (2 pre ľahké vozidlá a 1 pre všetky ostatné [2]).

Je možné tak očakávať model v tvare:

$$C_r = f(IRI, MPD, DEF, v, \dots)$$

Jeden z modelov bol vyvinutý v projekte ECRPD⁷ (lineárny v rýchlosti):

$$F_r = m \cdot (\eta_0 + \eta_1 \cdot (25 - T) + \mu_0 \cdot MPD + \mu_1 \cdot v \cdot MPD + \lambda_0 \cdot IRI + \lambda_1 \cdot v \cdot IRI)$$

kde:

- m je hmotnosť vozidla [kg],
- T je teplota vzduchu [°C],
- v je rýchlosť vozidla [m/s],
- MPD je priemerná hĺbka profilu [mm],
- IRI je medzinárodný index nerovností [mm/m],
- $\eta_0, \eta_1, \mu_0, \mu_1, \lambda_0, \lambda_1$ sú konštanty modelu.

Vidíme, že okrem lineárnych koeficientov MPD a IRI sa v ňom nachádzajú aj interakčné členy kombinujúce vzájomný vplyv oboch s rýchlosťou vozidla.

Trochu iný model nájdeme v HDM-4 s dvoma alternatívami vyjadrenia zložky technických parametrov vozovky podľa Bennetta (IRI a TD) a podľa Ceneka (uvažuje okrem nich aj únosnosť vyjadrenú priehybom pod pákovým priehybomerom). Tento model je popísaný v kap. 2.5.1.2.3.

Z uvedenej analýzy je zrejmé, že na veľkosť F_r majú intervencie správcu veľký vplyv, a to aj pri manažmente PTP vozoviek.

2.4.3 Odpor z pozdĺžneho sklonu F_g

Pri jazde vozidla do svahu pôsobí proti vozidlu nenulová zložka tiažovej sily (niekedy aj „gravitačný odpor“):

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\theta)$$

kde:

- m je hmotnosť vozidla [kg],
- g je tiažové zrýchlenie [m/s²],
- θ je uhol, ktorý zviera niveleta vozovky s horizontálou (pozdĺžny sklon).

Pri jazde vozidla zo svahu táto sila pôsobí v smere pohybu vozidla a kladieme jej veľkosti opačné znamienko.

Vozovka má v praxi len obmedzený, pomerne malý pozdĺžny sklon, a je možné použiť aproximačné vzťahy:

$$\theta \approx \sin(\theta) \approx \tan(\theta) = GR$$

kde GR je pozdĺžny sklon vyjadrený ako stúpanie/klesanie v desatinných číslach (napr. pre 5 % stúpanie je $GR = 0,05$).

Správca má na veľkosť F_g vplyv jedine nákladnými zmenami trasovania cesty. Pri manažmente PTP nemá na ňu žiaden vplyv.

⁷ Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation (2007 – 2009) [Šetrenie energie pri návrhu, údržbe a prevádzke ciest].

2.4.4 Odpor zo zotrvačnosti vozidla F_i

Pri zrýchľovaní vozidla sa prejavuje zotrvačný odpor pochádzajúci z hmotnosti vozidla samotného a zotrvačných účinkov rotujúcich častí vozidla prejavujúcich sa zvýšenou tzv. účinnou hmotnosťou vozidla. Potom [9]:

$$F_i = m_{eq} \cdot a$$

kde:

m_{eq} je účinná hmotnosť vozidla (ekvivalentná hmotnosť vozidla uvažujúca jeho rotujúce súčasti) [kg],

a je zrýchlenie vozidla [m/s^2].

Pre m_{eq} je možné uvažovať:

$$m_{eq} = m + m_w + m_e$$

kde:

m je hmotnosť vozidla [kg],

m_w je zotrvačná hmotnosť kolies [kg],

m_e je zotrvačná hmotnosť motora a hnacieho ústrojenstva [kg].

Vyčíslenie zotrvačných hmotností m_w a m_e rieši konkrétny model.

Ekvivalentná hmotnosť býva zhruba o 4 % vyššia ako je hmotnosť vozidla. [10]

Veľkosť F_i je závislá od parametrov vozidla a potreby akcelerácií, na ktoré má správca len veľmi malý vplyv (napr. zákaz jazdy vozidlám nad istú hmotnosť). V rámci manažmentu PTP nemá na F_i žiadny vplyv.

2.4.5 Odpor pri jazde v oblúku F_c

Pri prejazde vozidla v zákrute vychýlením pneumatík o malý uhol voči smeru jazdy vzniká dostredivá sila meniaci smer jazdy. Jej zložka oproti smeru jazdy pôsobí ako odporová sila. V zákrutách sa vozovka navyše klopí, čo vytvára ďalšiu odporovú silu.

Výsledná odporová sila zahŕňajúca oba tieto faktory F_c je [11]:

$$F_c = \frac{F_y^2}{C_a}$$

$$F_y = m \cdot \left(\cos(\gamma) \cdot \frac{v^2}{R} - g \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\beta) \right)$$

kde:

m je hmotnosť vozidla [kg],

C_a je tuhosť pneumatiky [N/rad],

γ je uhol klopenia (pričného sklonu) [rad],

β je uhol pozdĺžneho sklonu [rad],

R je polomer zákruty [m].

V rovnici pre F_y prvý člen zodpovedá za zložku zákruty a druhý člen za priečny sklon. Druhý člen je možné použiť na vozovkách majúcich nenulový priečny sklon aj na rovných úsekoch, ak je to účelné.

Správca pri manažmente PTP nemá na veľkosť F_c žiadny vplyv.

2.5 Prevádzkové náklady vozidiel

Prevádzkové náklady vozidiel (ang. „vehicle operating costs“, skr. VOC) pozostávajú z priamych nákladov vlastníctva alebo držby a prevádzky jednotlivého vozidla. Je zrejmé, že ich rozklad závisí od typu analyzovaného vozidla. Pre konvenčné vozidlá s klasickými spaľovacími motormi ide o náklady na:

1. spotrebu pohonných hmôt (PHM),
2. spotrebu mazív (motorových olejov),
3. opotrebovanie pneumatík,
4. údržbu a opravy vozidiel (vrátane nákladov na náhradné diely),
5. kapitálové náklady (odpisy, úroky).

Vo všeobecnosti je celková výška VOC funkciou:

1. konštrukčných charakteristík vozidla,
2. operačného módu vedenia vozidla (rýchlosť, zrýchlenie a pod.),
3. návrhových charakteristík pozemnej komunikácie (nepremenné technické parametre),
4. typu povrchu vozovky,
5. stavu povrchu vozovky,
6. poveternostných podmienok.

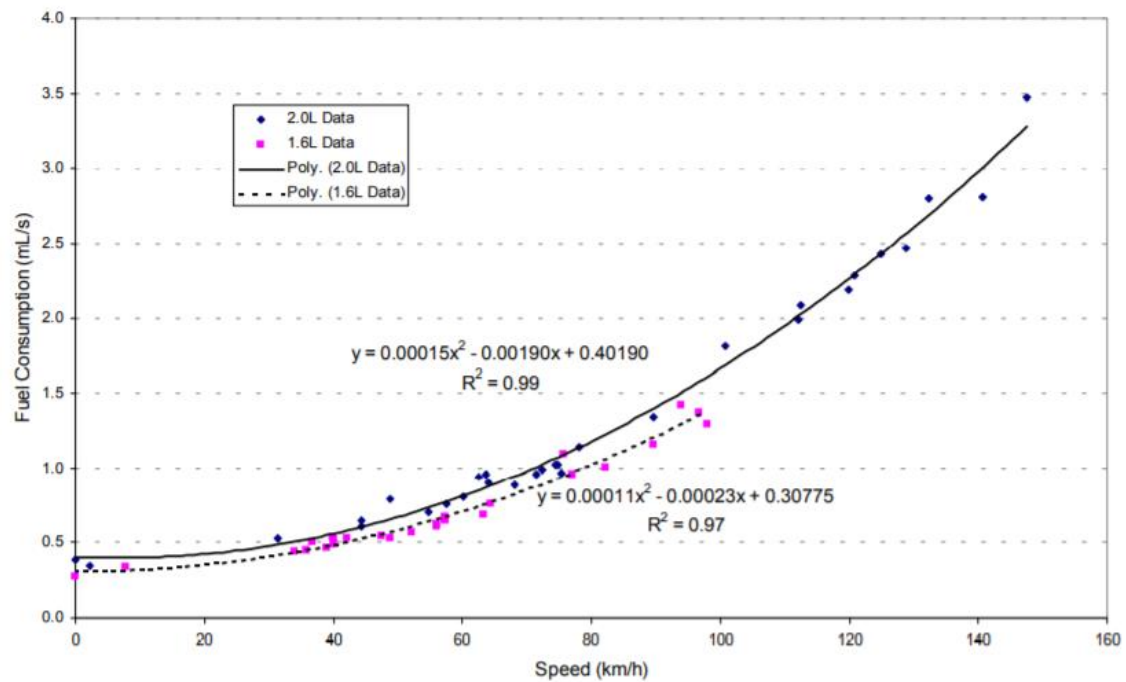
Niektoré z týchto vstupných parametrov majú vzájomné závislosti (napr. rýchlosť vedenia vozidla je limitovaná smerovým vedením a stavom povrchu vozovky).

2.5.1 Spotreba PHM

2.5.1.1 Všeobecne

Na spotrebu PHM ako jednu z hlavných a najuchopiteľnejších zložiek prevádzkových nákladov vozidiel bolo vytvorených veľa modelov. V zásade majú buď čisto empirickú alebo mechanisticko-empirickú povahu.

Empirické modely sú vytvorené väčšinou regresiou z dát palivomerov reálnej prevádzky. Ako explanatórna premenná je typicky použitá rýchlosť vozidla, napríklad:



Obrázok 5 Príklad empirického regresného modelu okamžitej spotreby paliva pri ustálenej rýchlosti (reprofoto [12])

Typický empirický viacnásobný (viacpremenný) regresný model je:

$$FC = a_0 + \frac{a_1}{S} + a_2 \cdot S^2 + a_3 \cdot RISE + a_4 \cdot FALL + a_5 \cdot IRI$$

kde:

S je rýchlosť vozidla [km/h],

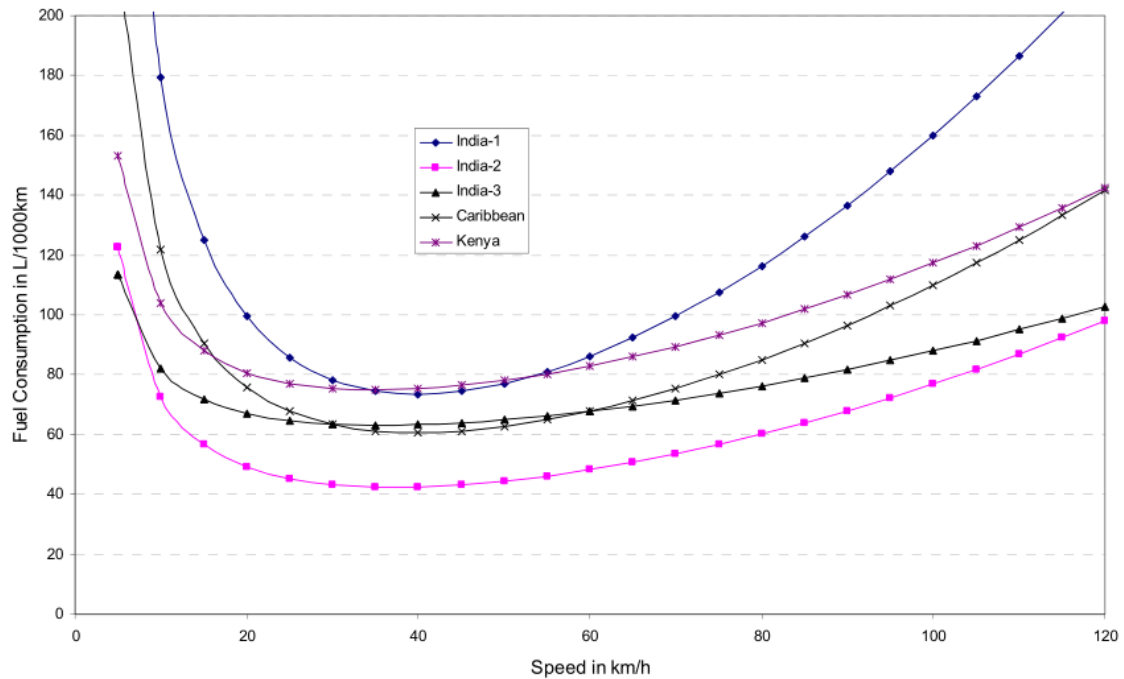
$RISE$ je stúpanie cesty [m/km],

$FALL$ je klesanie cesty [m/km],

IRI je IRI [m/mm],

a_0 až a_5 sú konštanty modelu.

Príklady týchto modelov pre osobné auto:



Obrázok 6 Empirický viacpremenný regresný model spotreby paliva v závislosti od rýchlosti vozidla (reprofoto z [2])

Základom mechanisticko-empirických modelov okamžitej spotreby paliva [ml/min] býva všeobecná rovnica [13] [14]:

$$FC = \alpha + \beta \cdot \max(0, P_t)$$

kde P_t je celkový potrebný okamžitý výkon [kW], α je spotreba paliva pri voľnobehu [ml/min] a β je miera termodynamickkej účinnosti [ml/min/kW]. Ide teda o lineárny vzťah medzi potrebným okamžitým výkonom a okamžitou spotrebou paliva, pričom je potrebné okrem konštánt α a β kvantifikovať jednotlivé odporové sily na výpočet potrebného výkonu. Spotreba paliva pri voľnobehu (α) sa dá väčšinou modelovať lineárnou regresiou v závislosti od objemu motora [14].

Z tejto rovnice a z vyššie uvedeného textu je okrem iného viditeľné aj to, že na výšku spotreby PHM pri manažmente PTP vozoviek má vplyv len zložka valivého odporu. Bude teda závisieť predovšetkým na jej vyčíslení v danom modeli, ako bude stav vozovky prispievať na výšku PHM.

2.5.1.2 Model spotreby PHM HDM-4

2.5.1.2.1. Okamžitá spotreba paliva IFC

Okamžitá spotreba paliva IFC je funkciou:

$$IFC = f(P_{tr}, P_{eng} + P_{accs})$$

kde:

IFC je počítaná okamžitá spotreba paliva [ml/s],

P_{tr} je potrebný trakčný výkon [kW],

P_{accs} je výkon potrebný na napájanie príslušenstva [kW],

P_{eng} je výkon potrebný na prekonanie vnútorných odporov motora [kW].

Trakčný výkon je potrebný na prekonanie odporov pôsobiacich proti pohybu vozidla. HDM-4 z nich modeluje týchto päť:

1. odpor vzduchu,
2. odpor proti valeniu,

3. odpor z pozdĺžneho sklonu cesty (stúpania),
4. odpor pri pohybe vozidla v oblúku,
5. odpor zo zotrvačnosti vozidla.

Pod príslušenstvom sa myslia vozidlové komponenty mimo motorovej sústavy, ktoré sú napájané motorom, ako napríklad ventilátor chladenia a alternátor.

IFC modeluje HDM-4 ako:

$$IFC = \max(\alpha, \xi \cdot P_{tot} \cdot (1 + dFUEL))$$

kde:

α je spotreba paliva pri voľnobehu [ml/s],

ξ je súčiniteľ palivovej efektivity [ml/kW/s],

P_{tot} je celkový požadovaný výkon [kW],

$dFUEL$ je inkrementálny prírastok spotreby paliva z dôvodov dopravných kongescií (pre danú rýchlosť a akceleračný šum),

pričom

$$\xi = \xi_b \cdot \left(1 + ehp \cdot \frac{P_{tot} - P_{eng}}{P_{rat}}\right)$$

kde:

ξ_b je základný súčiniteľ palivovej efektivity (rôzny pre zážihové a vznietové motory) [ml/kW/s],

ehp je úmerný pokles efektivity pri vysokom výstupnom výkone,

P_{rat} je menovitý (najväčší) výkon motora [kW] a

$$\begin{aligned} P_{tot} &= \frac{P_{tr}}{edt} + P_{accs} + P_{eng} & \text{ak } P_{tr} \geq 0 \\ P_{tot} &= edt \cdot P_{tr} + P_{accs} + P_{eng} & \text{ak } P_{tr} < 0 \end{aligned}$$

kde:

edt je súčiniteľ efektivity hnacieho ústrojenstva a

$$dFUEL = \frac{FC_{CONG}}{FC_{STEADY}}$$

kde:

FC_{CONG} je spotreba paliva pri kongescii danej nenulovým akceleračným šumom [ml/km],

FC_{STEADY} je spotreba paliva pri voľnom dopravnom prúde [ml/km].

Potrebný trakčný výkon sa vypočíta ako:

$$P_{tr} = (F_a + F_r + F_g + F_c + F_i) \cdot \frac{v}{1000}$$

kde:

F_a je odpor vzduchu [N],

F_r je odpor proti valeniu [N],

F_g je odpor z pozdĺžneho sklonu [N],

- F_c je odpor pri pohybe vozidla v oblúku [N],
 F_i je odpor zo zotrvačnosti vozidla [N],
 v je rýchlosť vozidla [m/s].

2.5.1.2.2. Špecifická spotreba paliva SFC

Z vypočítanej okamžitej spotreby vozidla IFC a rýchlosti vozidla v počítame už priamo špecifickú spotrebu vozidla (objem paliva v ml na 1 voz.km):

$$SFC = \frac{IFC}{v} \cdot 1000$$

2.5.1.2.3. Odporová sila proti valeniu F_r

Od technického stavu vozovky závisí len veľkosť odporovej sily proti valeniu F_r , ktorá sa počíta ako:

$$F_r = CR_2 \cdot F_{CLIM} \cdot (b_{11} \cdot N_w + CR_1 \cdot (b_{12} \cdot M + b_{13} \cdot v^2))$$

pričom:

$$CR_2 = K_{CR2} \cdot (a_0 + a_1 \cdot TD_{sp} + a_2 \cdot IRI) \text{ podľa Bennetta}$$

$$CR_2 = K_{CR2} \cdot (a_0 + a_1 \cdot TD_{sp} + a_2 \cdot IRI + a_3 \cdot DEF) \text{ podľa Ceneka}$$

$$F_{CLIM} = 1 + 0,003 \cdot PC_{TDS} + 0,002 \cdot PC_{TDW}$$

kde:

- CR_2 je súčiniteľ zložky povrchu vozovky,
 F_{CLIM} je klimatický súčiniteľ jazdy na snehu a za dažďa,
 N_w je počet kolies,
 CR_1 je súčiniteľ zložky pneumatík a je funkciou počtu a priemeru kolies,
 M je hmotnosť vozidla [kg],
 v je rýchlosť vozidla [m/s],
 K_{CR2} je kalibračný súčiniteľ,
 TD_{sp} je hĺbka textúry z pieskovej metódy [mm],
 IRI je hodnota parametra IRI [m/km],
 DEF je priehyb meraný pákovým priehybomerom (Benkelmanov nosník) [mm],
 a_0, a_1, a_2, a_3 sú konštanty určené pre typ povrchu vozovky a pohotovostnej hmotnosti vozidla (sú rôzne pre model podľa Bennetta a podľa Ceneka),
 PC_{TDS} je percentuálny podiel jazdy na snehom pokrytých vozovkách,
 PC_{TDW} je percentuálny podiel jazdy na mokrych vozovkách.

V aktuálnej verzii HDM-4 nie je úplne zrejmé, či do výpočtu F_r vstupuje parameter DEF alebo nie. Manuál uvádza stále vzťah podľa Bennetta bez DEF a tento používajú aj najnovšie verzie HDM-Tools z roku 2019. Z toho dôvodu a z dôvodu, že na Slovensku nedisponujeme zatiaľ aj tak dátami o priehyboch na úrovni cestnej siete, budeme ďalej používať aj my vzťah podľa Bennetta.

Veľkosť ostatných odporových zložiek nie je modelovaná podľa stavu vozovky a uvádzame ich v ďalších podkapitolách len pre referenciu.

2.5.1.2.4. Odporová sila vzduchu F_a

$$F_a = 0,5 \cdot \rho \cdot CD_{mult} \cdot CD \cdot AF \cdot v^2$$

kde:

ρ je hustota vzduchu [kg/m³],
 CD je súčiniteľ odporu vzduchu,
 CD_{mult} je multiplikátor súčiniteľa odporu vzduchu,
 AF je čelná plocha [m²],
 v je rýchlosť vozidla [m/s].

2.5.1.2.5. Odporová sila z pozdĺžneho sklonu F_g

$$F_g = M \cdot GR \cdot g$$

kde:

M je hmotnosť vozidla [kg],
 GR je sklon; pri jazde do kopca má kladnú hodnotu, pri jazde kopca zápornú hodnotu [rad],
 g je gravitačné zrýchlenie [m/s²].

2.5.1.2.6. Odporová sila pri jazde v oblúku F_c

$$F_c = \max \left(0, \frac{\left(\frac{M \cdot v^2}{R} - M \cdot g \cdot e \right)^2}{N_w \cdot Cs} \cdot 10^{-3} \right)$$

kde:

M je hmotnosť vozidla [kg],
 v je rýchlosť vozidla [m/s],
 R je polomer krivosti [m],
 e je priečny sklon (klopenie) počítaný so zreteľom na správanie vodiča v zákrute ako funkcia polomeru krivosti v zákrute [m/m],
 N_w je počet kolies,
 Cs je tuhosť pneumatík pri jazde v oblúku [kN/rad]

2.5.1.2.7. Odporová sila zo zotrvačnosti vozidla F_i

$$F_i = M \cdot \left(a_0 + a_1 \cdot \arctan \frac{a_2}{v^3} \right) \cdot a$$

kde:

M je hmotnosť vozidla [kg],
 v je rýchlosť vozidla [m/s],
 a je zrýchlenie vozidla [m/s²],

a_0, a_1, a_2 sú konštanty účinného pomeru hmotností pre dané vozidlo. Výraz v zátvorke je funkcia súčiniteľa účinnej hmotnosti (pomeru účinnej a pokojovej hmotnosti vozidla) – tzv. účinný pomer hmotností.

Pri výpočte P_{tr} sa z praktických dôvodov *neuvažuje zrýchľovanie vozidiel* – predpokladá sa jazda ustálenou rovnomernou rýchlosťou. Kladie sa teda $F_i = 0$ a efekty zvýšenej spotreby PHM z dôvodov zrýchľovania a spomaľovania sa kompenzujú cez súčiniteľ $dFUEL$.

2.5.1.2.8. Záver

Z hľadiska stavu povrchu vozovky v modeli HDM-4 vplýva na výšku spotreby PHM:

1. pozdĺžna nerovnosť vyjadrená ako IRI,

2. makrotextúra vozovky vyjadrená jej hĺbkou meranou vysypaním piesku (MTD),
3. priehyb pod pákovým priehybomerom (DEF)⁸ – v modeli valivého odporu podľa Ceneke.

Priehyb nameraný pákovým priehybomerom je možné vypočítať z merania FWD zariadením KUAB, ktorým disponuje SSC podľa vzťahu [15]:

$$DEF = 1,44 \cdot y_{KUAB}$$

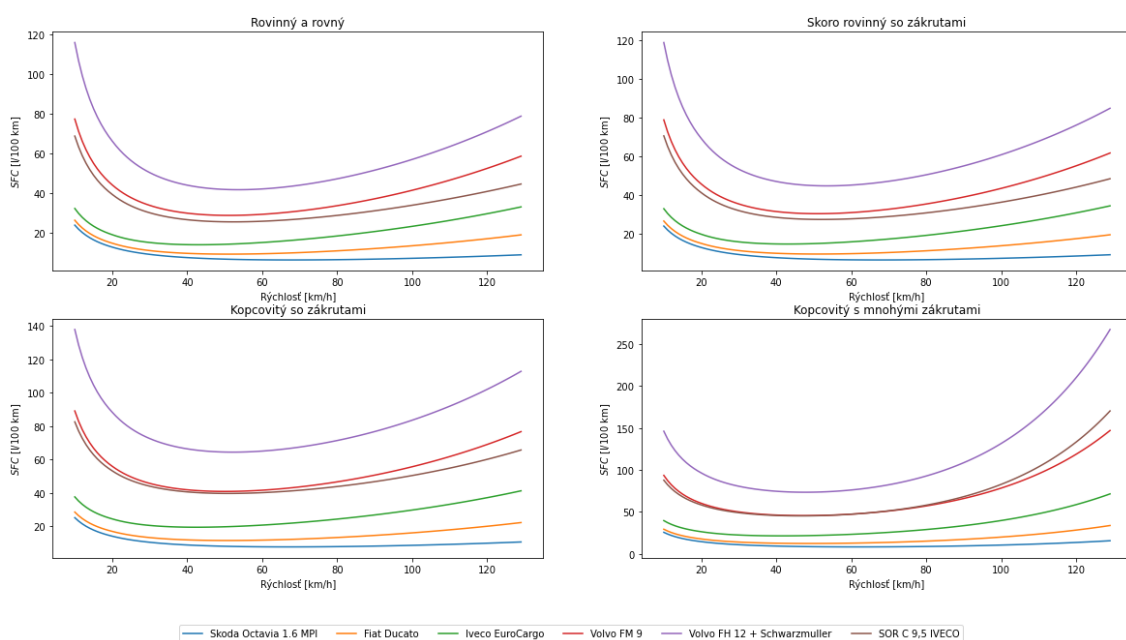
Makrotextúru vyjadrenú parametrom MTD môžeme vypočítať z hodnoty MPD meranej vysokorýchlostným laserovým profilometrom vo vlastníctve SSC podľa približného vzťahu:

$$MTD \cong 0,2 + 0,8 \cdot MPD$$

Nasledujúce diagramy ilustrujú závislosť špecifickej spotreby paliva v l/100/km:

- od rýchlosti vozidiel na štyroch štandardných úsekoch,
- od rýchlosti na štandardnom rovnom a rovinnom úseku pre vybrané hodnoty IRI,
- od IRI na štandardnom rovnom a rovinnom úseku pre vybrané hodnoty rýchlostí,
- od rýchlosti na štandardnom rovnom a rovinnom úseku pre vybrané hodnoty MPD,
- od MPD na štandardnom rovnom a rovinnom úseku pre vybrané hodnoty rýchlostí.

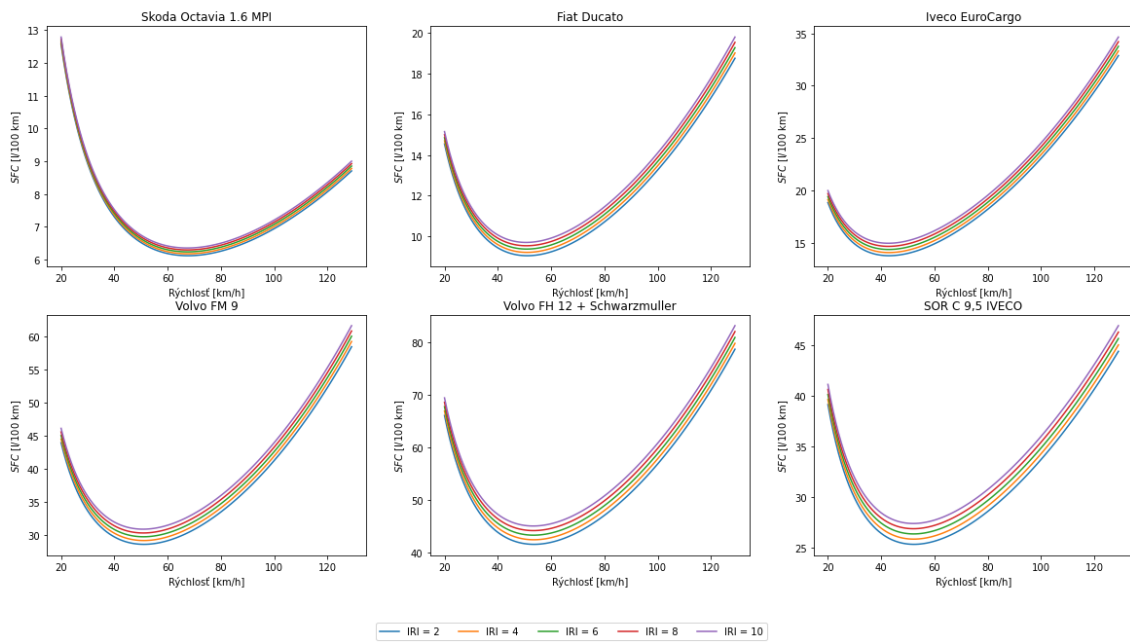
Závislosť špecifickej spotreby paliva SFC voči rýchlosti v



Obrázok 7 Závislosť spotreby paliva od rýchlosti na štyroch štandardných úsekoch (rôzne smerové a výškové vedenie); výborný stav vozovky

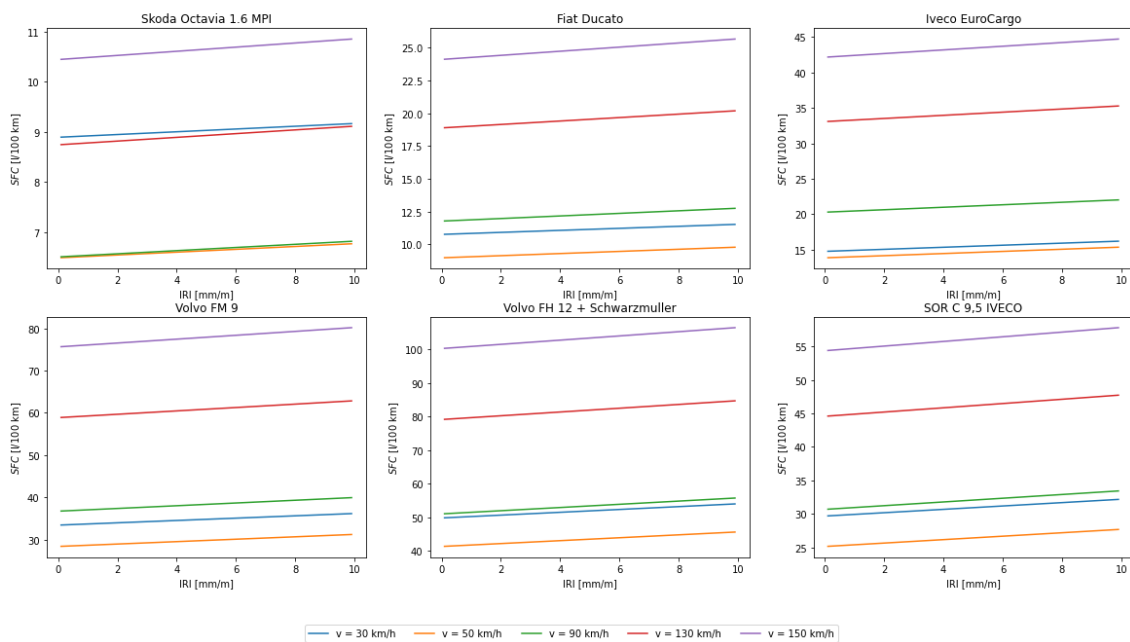
⁸ len pre ťažké vozidlá (pohotovostná hmotnosť nad 2,5 t) na asfaltových vozovkách

Závislosť špecifickej spotreby paliva SFC voči rýchlosti v pre rôzne hodnoty IRI



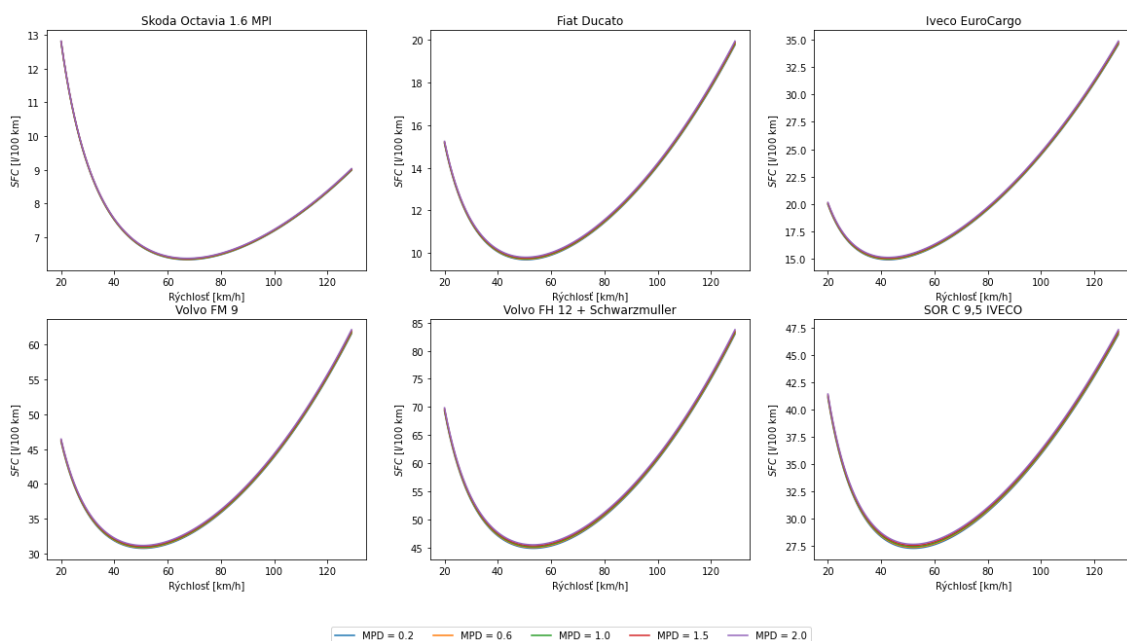
Obrázok 8 Závislosť spotreby paliva od rýchlosti na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty IRI

Závislosť špecifickej spotreby paliva SFC voči IRI v pre rôzne rýchlosti



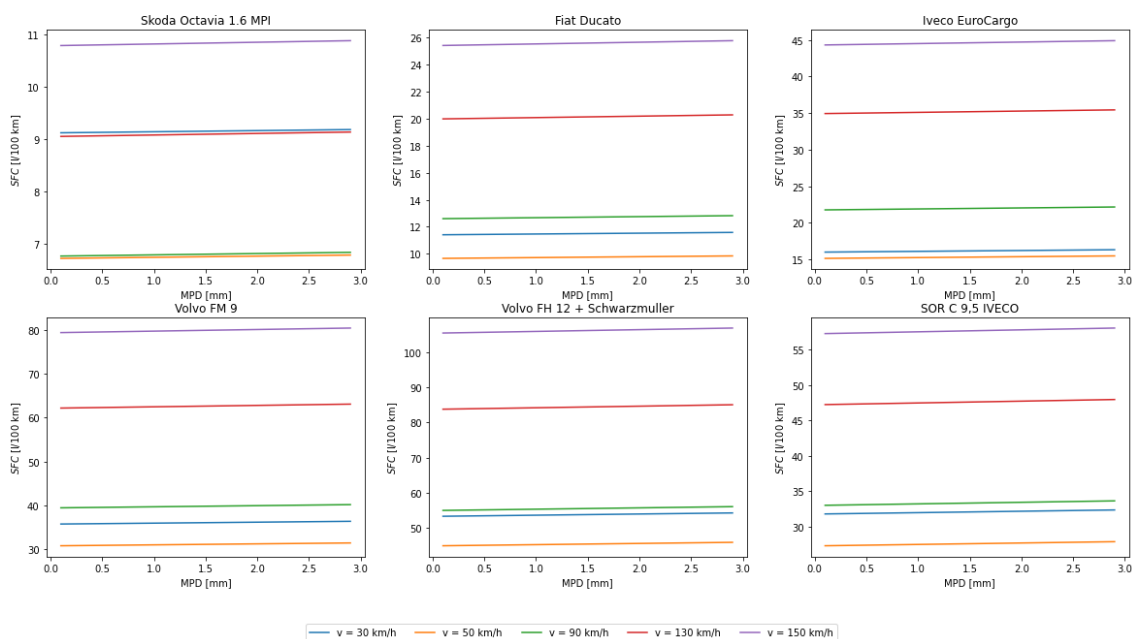
Obrázok 9 Závislosť spotreby paliva od IRI na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty rýchlosti

Závislosť špecifickej spotreby paliva SFC voči rýchlosti v pre rôzne hodnoty MPD



Obrázok 10 Závislosť spotreby paliva od rýchlosti na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty MPD

Závislosť špecifickej spotreby paliva SFC voči MPD v pre rôzne rýchlosti



Obrázok 11 Závislosť spotreby paliva od MPD na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty rýchlosti

2.5.2 Model spotreby paliva MIRAVEC

V rámci medzinárodného projektu MIRAVEC zastrešeného spolkom CEDR, cieľom ktorého bolo analyzovať možnosti redukcie energií a emisií CO_2 v cestnej infraštruktúre, boli popísané zjednodušené modely spotreby paliva [16].

Základný model bol pripravený v medzinárodnom projekte MIRIAM a vychádza zo švédskych modelov EVA a VETO (túto časť projektu MIRAVEC riešil tím zo Švédskeho národného inštitútu pre cestný a dopravný výskum – VTI) [17]:

$$F_{c_s} = c_1 \cdot (1 + k_5 \cdot (F_r + F_a + d_1 \cdot ADC \cdot v^2 + d_2 \cdot RF + d_3 \cdot RF^2))^{e_1} \cdot v^{e_2}$$

kde:

- F_{c_s} je simulovaná spotreba paliva [l/10 km],
 F_r je sila odporu proti valeniu [N],
 F_a je sila odporu vzduchu [N],
 ADC je priemerný dĺžkovo vážený stupeň krivosti [rad/km],
 RF je stúpanie/klesanie (pozdĺžny sklon)⁹ [m/km],
 v je rýchlosť vozidla [km/h].

$$F_r = (Cr_{00} + Cr_{temp} \cdot (5 - T) + Cr_1 \cdot IRI \cdot v + Cr_2 \cdot MPD) \cdot m \cdot g$$

kde:

- T je teplota okolia [°C],
 IRI je pozdĺžna nerovnosť v IRI [m/mm]
 MPD je priemerná hĺbka makrotextúry [mm],
 m je hmotnosť vozidla [kg],
 g je tiažové zrýchlenie [m/s²].
 $Cr_{00}, Cr_{temp}, Cr_1, Cr_2$ sú parametre modelu valivého odporu.

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_{yz} \cdot \rho \cdot v^2$$

kde:

- C_d je koeficient dynamického odporu vzduchu,
 A_{yz} je čelná plocha vozidla [m²],
 ρ je hustota vzduchu [kg/m³],
 v je rýchlosť vozidla [m/s].

Hustotu vzduchu na mieste danom tlakom vzduchu P_{air} a teplotou vzduchu T môžeme približne určiť ako:

$$\rho = \frac{348,7}{1000} \cdot \frac{P_{air}}{T + 273}$$

kde:

- P_{air} je tlak vzduchu [mbar],
 T je teplota okolitého vzduchu [°C].

Ostatné symboly sú parametre modelu pre daný typ vozidla. V projekte MIRIAM boli pripravené modely pre osobné vozidlo, nákladné vozidlo a nákladnú súpravu s prívesom.

Pre modelovanie minutej energie a emisií CO₂ v projekte MIRAVEC boli tri základné typy nedostačujúce. Spotreba paliva pre ďalšie typ vozidiel s rôznymi palivami (benzín, nafta, LPG), rôzne kategórie (osobné auto, ľahké a ťažké nákladné vozidlo, návesová súprava/nákladné vozidlo s prívesom a motocykle) a v rôznych emisných triedach (pre-

⁹ rovnaká definícia ako v HDM-4

Euro, Euro 1 až Euro 6) vychádza z popísanej rovnice násobená korekčnými faktormi z tabuliek.

Voľná rýchlosť vozidiel v sa určuje anglickým modelom COBA. Ten však neuvažuje s vplyvom stavu povrchu vozovky na voľné rýchlosti, ako HDM-4.

Švédsky model EVA uvažuje redukciu rýchlosti kvôli stavu povrchu vozovky takto:

$$\begin{aligned} dv_{car} &= -0,11 \cdot RUT - 1,33 \cdot IRI && \text{pre osobné vozidlá} \\ dv_{hgv} &= -0,12 \cdot RUT - 1,17 \cdot IRI && \text{pre ťažké nákladné vozidlá} \\ dv_{tr+tr} &= -0,09 \cdot RUT - 2,31 \cdot IRI && \text{pre náv. súp. a ťažké NV s prívesmi} \end{aligned}$$

Uvedené redukcie sú lineárne v premennej RUT, ako aj v IRI. Zo štúdií však vieme, že v istom spektre celkom dobrého stavu povrchu vozoviek sa rýchlosti neznižujú. Navyše žiadna cesta, ani novopostavená, nemá nulové IRI a nie je reálne očakávať na takejto ceste zníženie rýchlosti podľa uvedených vzorcov.

V projekte MIRAVEC sa preto pristúpilo k úpravám:

$$\begin{aligned} dv_{car} &= \min(0; -0,11 \cdot (RUT - 5)) + \min(0; 1,33 \cdot (IRI - 5)) && \text{pre osobné vozidlá} \\ dv_{hgv} &= \min(0; -0,12 \cdot (RUT - 5)) + \min(0; -1,17 \cdot (IRI - 3)) && \text{pre ťažké NV} \\ dv_{tr+tr} &= \min(0; -0,09 \cdot (RUT - 5)) + \min(0; -2,31 \cdot (IRI - 3)) && \text{pre NS a ťažké NV s priv.} \end{aligned}$$

Navyše rýchlosti pod 45 km/h už nie sú znižované vplyvom koľají a IRI (pri takýchto nízkych rýchlostiach sa už nezdá ich vplyv významný).

2.5.3 Spotreba mazív

2.5.3.1 Všeobecne

Modely pre spotrebu motorových olejov nebývajú na rozdiel od ostatných komponentov prevádzkových nákladov vozidiel zložené. Typicky sa modeluje fixná zložka a variabilná zložka závislá od spotreby paliva, ako je vidno pre model HDM-4 popísaný v nasledujúcej kapitole.

2.5.3.2 Spotreba mazív v HDM-4

Model spotreby motorového oleja HDM-4 predpovedá jeho spotrebu v litroch na 1000 km ako funkciu najazdenej vzdialenosti a spotreby paliva. Model je založený na práci W. J. Pieenara v Južnej Afrike.

Skladá sa z dvoch častí:

1. spotreba oleja kvôli jeho kontaminácii (zložka závislá na prejazdenej vzdialenosti),
2. spotreba oleja pri prevádzke motora (zložka závislá na spotrebe paliva).

$$OIL = \frac{OILCAP}{DISTCHNG} + OILOPER \cdot FC$$

kde:

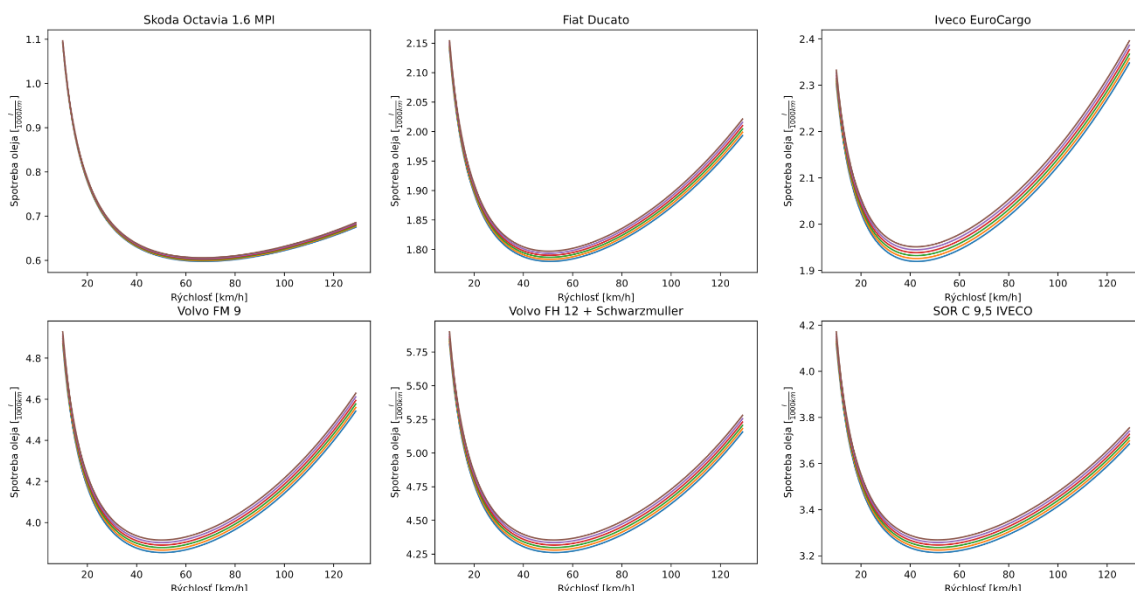
OIL	je spotreba oleja [l/(1000 km)]
$OILCAP$	je objem oleja v motore [l],
$DISTCHNG$	je dĺžkový interval výmeny oleja [1000.km],
$OILOPER$	je strata oleja pri prevádzke motora; konštanta pre typ vozidla [l/(1000 km)],

FC je spotreba paliva [$l/(1000 \text{ km})$].

2.5.3.3 Záver

Spotreba motorového oleja v modeli HDM-4 je citlivá na stav vozovky cez vnútornú závislosť variabilnej zložky od spotreby PHM. Platia teda rovnaké závery vzhľadom na manažment PTP, ako sú uvedené v predchádzajúcej kapitole.

Závislosť spotreby oleja od rýchlosti pre hodnoty IRI {0, 2, 4, 6, 8, 10} mm/m



Obrázok 12 Spotreba motorového oleja v $\frac{1}{1000 \text{ km}}$ v závislosti od rýchlosti na štandardnom rovnom úseku pre rôzne hodnoty IRI v intervale 0 až 10 mm/m pre rôzne typy vozidiel v modeli HDM-4 SK

2.5.4 Spotreba pneumatík

2.5.4.1 Všeobecne

Jazdou po vozovke sa kontinuálne pneumatiky kontinuálne opotrebovávajú, a to predovšetkým:

- behúň pneumatiky – abrazívne a únavové opotrebovanie a termodynamická dekompozícia,
- kostra pneumatiky – únavové a mechanické poškodenia.

Vyvinuté boli modely:

- empirické, a to väčšinou z flotilových údajov,
- mechanistické, založené na pohybových rovniciach.

2.5.4.2 Model opotrebenia pneumatík HDM-4

Model spotreby (opotrebovania) pneumatík je, ako aj ostatné modely v HDM-4, mechanisticko-empirický. Princiálne vzťahy sú odvodené z pohybových fyzikálnych rovníc s kalibračnými koeficientami, ktoré umožňujú flexibilné prispôsobenie modelu na lokálne alebo nové podmienky. Model integruje tak opotrebovanie behúňa, ako aj kostry.

2.5.4.2.1. Celková spotreba pneumatík TC

Modelovaná výstupná premenná je TC ako celkové opotrebovanie pneumatík v % na km a jej všeobecné vyjadrenie je:

$$TC = \frac{N_w \cdot EQNT}{MODFAC}$$

kde:

N_W je počet kolies na vozidle,

$EQNT$ je opotrebovanie jednej tzv. ekvivalentnej novej pneumatiky [%/km],

$MODFAC$ je modifikačný súčiniteľ životnosti pneumatiky podľa Harrisona a Aziza zohľadňujúci rôzne účinky rôznych vozidiel (ľahšie vozidlá opotrebovávajú pneumatiky menej), pneumatík (radiálne pneumatiky sa opotrebovávajú menej ako diagonálne) a kongescií.

2.5.4.2.2. Spotreba ekvivalentnej novej pneumatiky $EQNT$

Spotreba ekvivalentnej novej pneumatiky sa počíta ako:

$$EQNT = \frac{1 + 0,01 \cdot RREC \cdot NR}{DISTOT} + 0,0027$$

kde:

$RREC$ sú náklady na protektorovanie pneumatík ako % ceny novej pneumatiky (východisková hodnota je 15 % pre všetky typy vozidiel flotily),

NR je počet protektorovaní kostry pneumatiky,

$DISTOT$ je celková ubehnutá vzdialenosť pneumatiky počas jej života (kostry pneumatiky) [$\times 1000$ km].

2.5.4.2.3. Počet protektorovaní NR

Počet protektorovaní NR sa modeluje ako:

$$NR = \max(0, NR_0 \cdot e^{-0,03224 \cdot IRI_{mod}} - 1)$$

kde:

NR_0 je tzv. základná hodnota protektorovaní (konštanta typu vozidla; východisková hodnota je 1,30),

IRI_{mod} je priemerná pozdĺžna nerovnosť vyjadrená ako IRI, modifikovaná tak, že ťažké nákladné vozidlá používajú ako hodnotu $\min(7, IRI)$; stredne ťažké nákladné vozidlá hodnotu 7 a ostatné vozidlá skutočnú priemernú hodnotu IRI .

2.5.4.2.4. Celková ubehnutá vzdialenosť pneumatiky $DISTOT$

Celková ubehnutá vzdialenosť pneumatiky:

$$DISTOT = (1 + NR) \cdot \frac{VOL}{TWT}$$

kde:

VOL je objem opotrebovateľného gumového materiálu; konštanta typu vozidla [dm^3],

TWT je rýchlosť opotrebovania behúňa [$\text{dm}^3/1000 \text{ voz.km}$].

2.5.4.2.5. Rýchlosť spotreby behúňa TWT

Rýchlosť spotreby behúňa TWT je kľúčová premenná a modeluje sa ako lineárna funkcia tangenciálnej energie:

$$TWT = C_{otc} + C_{tcte} \cdot TE$$

kde:

C_{otc} je konštanta modelu (daná pre typ vozidla) [dm^3],

C_{tcte} je súčiniteľ opotrebovania behúňa modelu [$\frac{\text{dm}^3}{\text{J.m}^{-1}}$],

TE je jednotková tangenciálna energia pneumatiky [J/m].

Tangenciálna energia sa počíta:

$$TE = \frac{CFT^2 + LFT^2}{NFT}$$

kde:

CFT je obvodová sila pôsobiaca na pneumatiku [N],

LFT je laterálna sila pôsobiaca na pneumatiku [N],

NFT je normálová sila pneumatiky [N].

Obvodová sila:

$$CFT = \frac{(1 + CTCON \cdot dFUEL) \cdot (F_a + F_g + F_r)}{N_W}$$

kde:

$CTCON$ je inkrementálna zmena spotreby pneumatík vzhľadom na dodatočnú spotrebu paliva vyjadrenú cez $dFUEL$,

$dFUEL$ je dodatočná spotreba paliva vyvolaná zmenami rýchlosti vozidiel (definované vyššie),

F_a je odpor vzduchu (definovaný vyššie) [N],

F_g je odpor z pozdĺžneho sklonu (definovaný vyššie) [N],

F_r je odpor proti valeniu (definovaný vyššie) [N],

N_W je počet kolies vozidla.

Laterálna sila:

$$LFT = \frac{F_c}{N_W}$$

kde:

F_c je odpor pri jazde v oblúku (definovaný vyššie) [N],

N_W je počet kolies vozidla.

Normálová sila:

$$NFT = \frac{m_{oper} \cdot g}{N_W}$$

kde:

m_{oper} je pohotovostná hmotnosť vozidla [kg],

g je tiažové zrýchlenie [m/s^2],

N_W je počet kolies vozidla.

2.5.4.2.6. Modifikačný súčiniteľ **MODFAC**

Modifikačný súčiniteľ:

$$MODFAC = VEHFAC \cdot TYREFAC \cdot CONGFAC$$

kde:

$VEHFAC$ je súčiniteľ zohľadňujúci typ vozidla (ľahké vozidlá 2,0; stredné a ťažšie vozidlá 1,0),

$TYREFAC$ je súčiniteľ zohľadňujúci typ pneumatiky (na spevnených vozovkách má hodnotu 1,00 pre diagonálne pneumatiky a 1,25 pre radiálne pneumatiky),

$CONGFAC$ je súčiniteľ zohľadňujúci účinky kongescií a zrýchľovaní:

$$CONGFAC = \begin{cases} 1 & \text{keď } Q_p < Q_0 \\ 1 - \frac{0,3 \cdot (Q_p - Q_0)}{Q_{nom} - Q_0} & \text{keď } Q_0 \leq Q_p \leq Q_{nom} \\ 0,7 - \frac{0,2 \cdot (Q_p - Q_{nom})}{Q_{ult} - Q_{nom}} & \text{keď } Q_{nom} < Q_p \leq Q_{ult} \end{cases}$$

kde:

Q_p je dopravná intenzita v analyzovanom období [jv/h],

Q_0 je intenzita začiatku vzájomného ovplyvňovania vozidiel [jv/h],

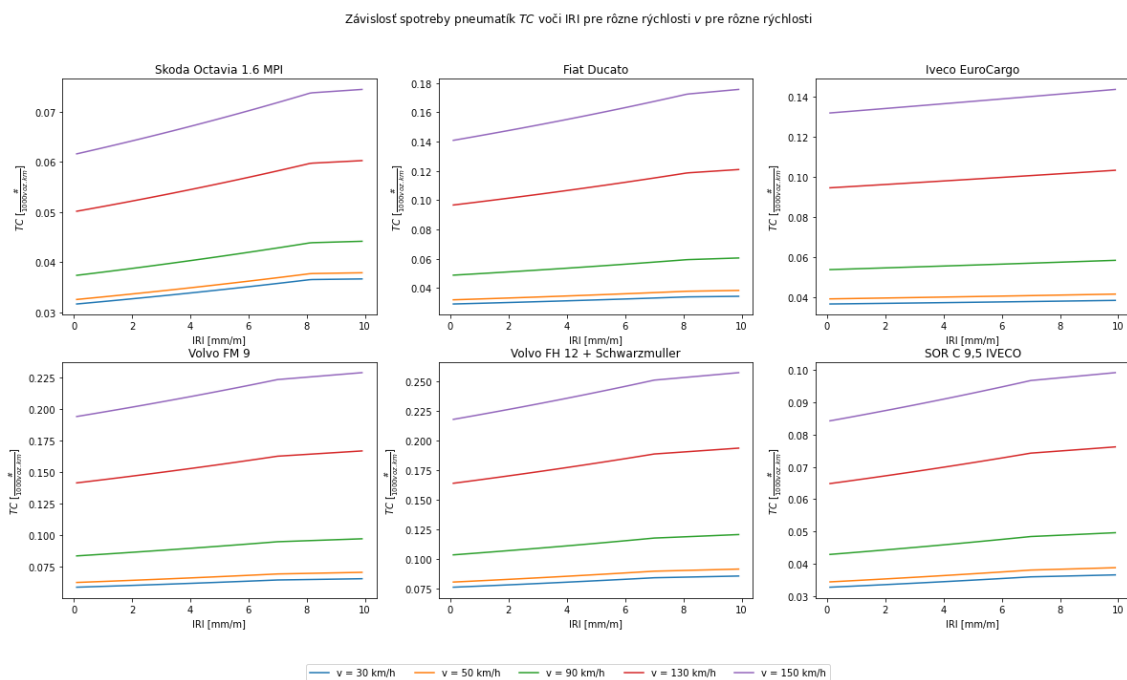
Q_{nom} je nominálna kapacita úseku [jv/h],

Q_{ult} je ultimátna kapacita úseku [jv/h].

2.5.4.3 Záver

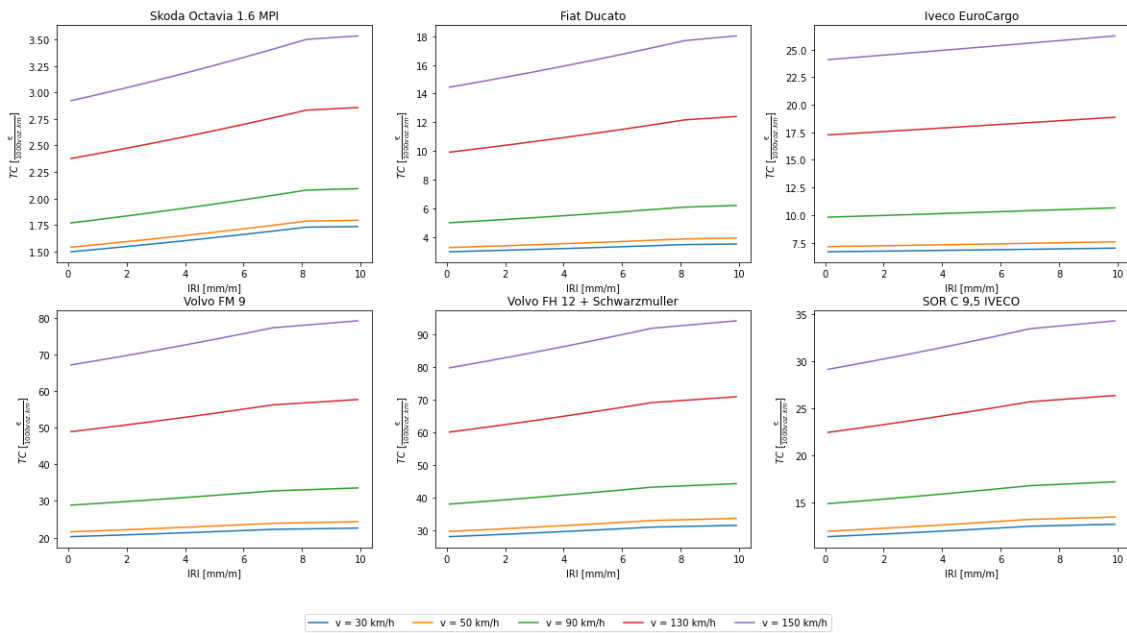
Modelované opotrebovanie pneumatík v HDM-4 závisí od aktuálneho stavu vozovky:

- od IRI – priamo pri výpočte počtu protektorovaní NR a pri výpočte obvodovej sily cez veľkosť valivého odporu F_r ,
- od MPD – pri výpočte obvodovej sily cez veľkosť valivého odporu F_r .



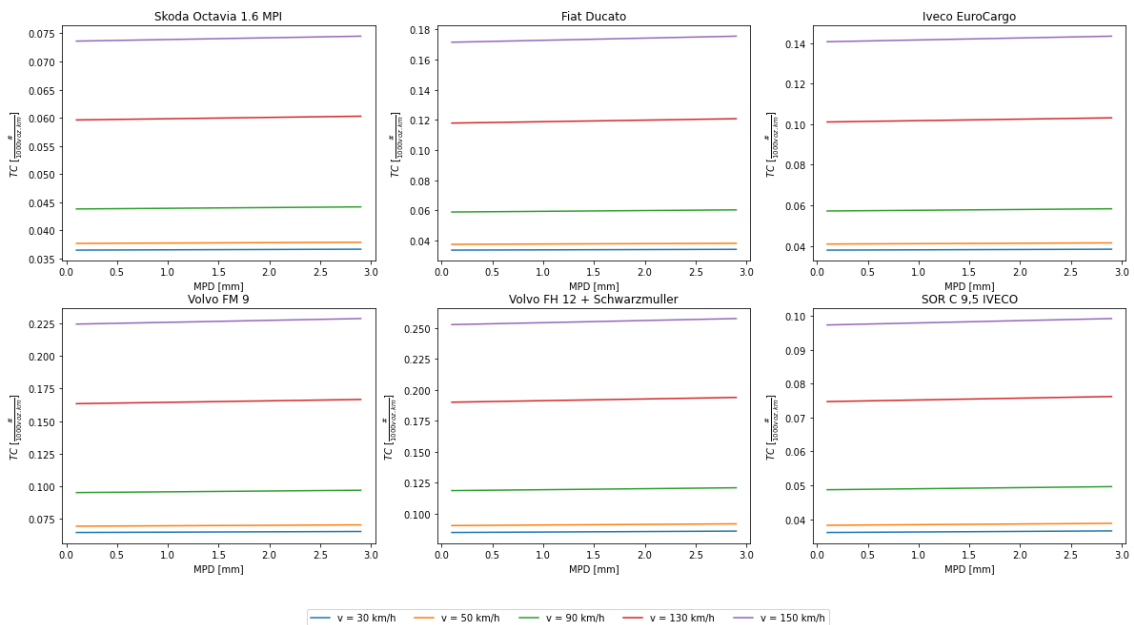
Obrázok 13 Závislosť spotreby pneumatík od IRI na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty rýchlosti

Závislosť spotreby pneumatík TC voči IRI pre rôzne rýchlosti v pre rôzne rýchlosti



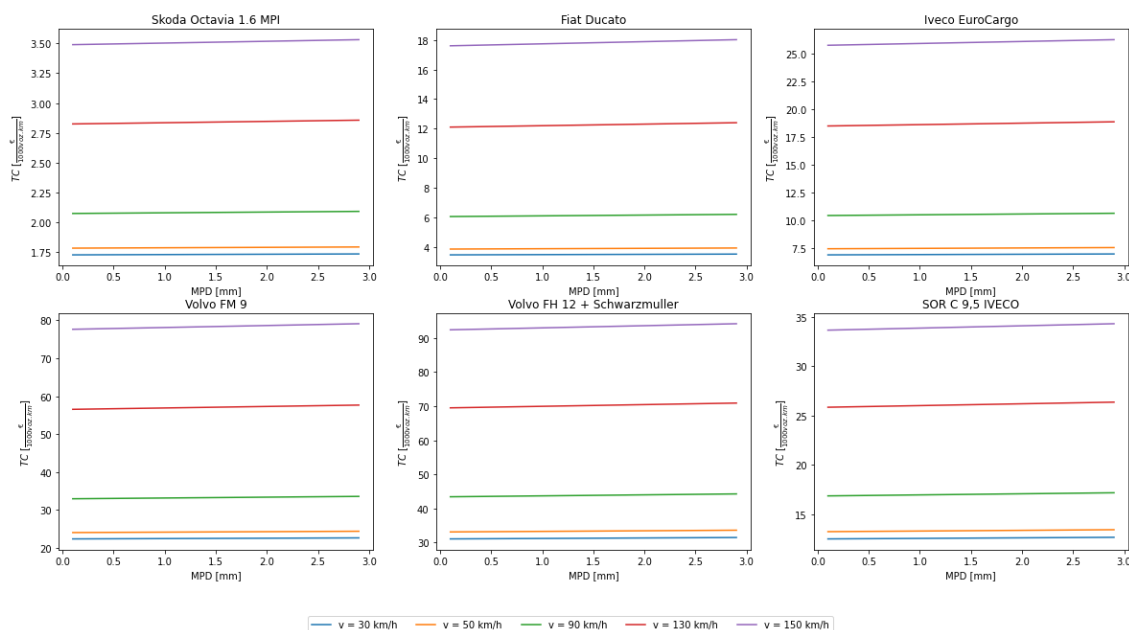
Obrázok 14 Závislosť spotreby pneumatík v ekonomickej cene od IRI na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty rýchlosti

Závislosť spotreby pneumatík TC voči MPD pre rôzne rýchlosti v pre rôzne rýchlosti



Obrázok 15 Závislosť spotreby pneumatík od MPD na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty rýchlosti

Závislosť spotreby pneumatík TC voči MPD pre rôzne rýchlosti v pre rôzne rýchlosti



Obrázok 16 Závislosť spotreby pneumatík v ekonomickej cene od MPD na štandardnom rovnom úseku pre vozidlá HDM-4 SK pre rôzne hodnoty rýchlosti

2.5.5 Náklady na údržbu a opravu vozidiel

2.5.5.1 Všeobecne

Náklady na údržbu a opravu vozidiel sa skladajú z dvoch hlavných častí:

1. náklady na náhradné diely,
2. náklady na servisné práce.

Vývoj týchto modelov patrí spomedzi modelov prevádzkových nákladov vozidiel medzi najťažšie [2] (niektoré dôvody: náklady sú veľmi nepravidelné počas životnosti vozidla, jednotliví prevádzkovatelia vozidiel majú veľmi odlišný prístup k údržbe a opravám vozidiel, náklady na údržbu a opravy môžu byť veľmi odlišné pre rôzne značky a modely aj v rovnakej triede vozidiel, vozidlá jazdia počas svojej životnosti v širokom spektre podmienok – je komplikované odvodiť vzťah medzi nákladmi na údržbu a nákladmi na opravu vozidiel a prevádzkovými podmienkami).

2.5.5.2 Spotreba náhradných dielov v HDM-4

Hlavné faktory spotreby náhradných dielov v HDM-4 sú:

1. počet najazdených kilometrov vozidla počas jeho životnosti,
2. pozdĺžna nerovnosť vozovky,
3. cykly zmien rýchlostí (zrýchľovania a spomaľovania) kvôli kongesciám, smerovému a výškovému vedeniu, prítomnosti nemotorovej dopravy a pod.

Spotreba náhradných dielov sa modeluje ako podiel z ceny nového vozidla na 1000 voz.km:

$$PC = K_{opc} \cdot (CKM^{KP} \cdot (a_0 + a_1 RI_{adj}) + K_{1pc}) \cdot (1 + C_{PCON} \cdot dFUEL)$$

kde:

CKM je priemerný počet najazdených kilometrov,

KP je exponent veku upravujúci strmlosť krivky životnosti vozidla (pre daný typ vozidla),

RI_{adj} je upravená pozdĺžna nerovnosť IRI,

CPCON je inkrementálny zmenový súčiniteľ vzhľadom na zmeny rýchlosti vozidiel; udáva zvýšenie spotreby náhradných dielov pri zvýšení spotreby paliva kvôli zmene rýchlosti ako pomer vzhľadom na toto zvýšenie (východisková hodnota je 0,1),

dFUEL je súčiniteľ dodatočnej spotreby paliva vzhľadom na zmeny rýchlosti,

a_0 je konštantný parameter modelu pre daný typ vozidla,

a_1 je parameter modelu lineárny k pozdĺžnej nerovnosti pre daný typ vozidla,

K_{0pc} je rotačný kalibračný faktor modelu (východisková hodnota 1,0),

K_{1pc} je translačný kalibračný faktor modelu (východisková hodnota 0,0).

Zmysel úpravy pozdĺžnej nerovnosti spočíva v tom, že spotrebu náhradných dielov ovplyvňuje až od istej úrovne:

$$RI_{ajd} = \max(IRI_{av}, \min(RI_0, RI_{min} + a_2 \cdot IRI_{av}^{a_3})) \quad (2.1)$$

kde:

IRI_{av} je priemerná pozdĺžna nerovnosť vyjadrená ako IRI,

RI_{min} je minimálna hodnota IRI použitá v modeli (východisková hodnota je 3,0)

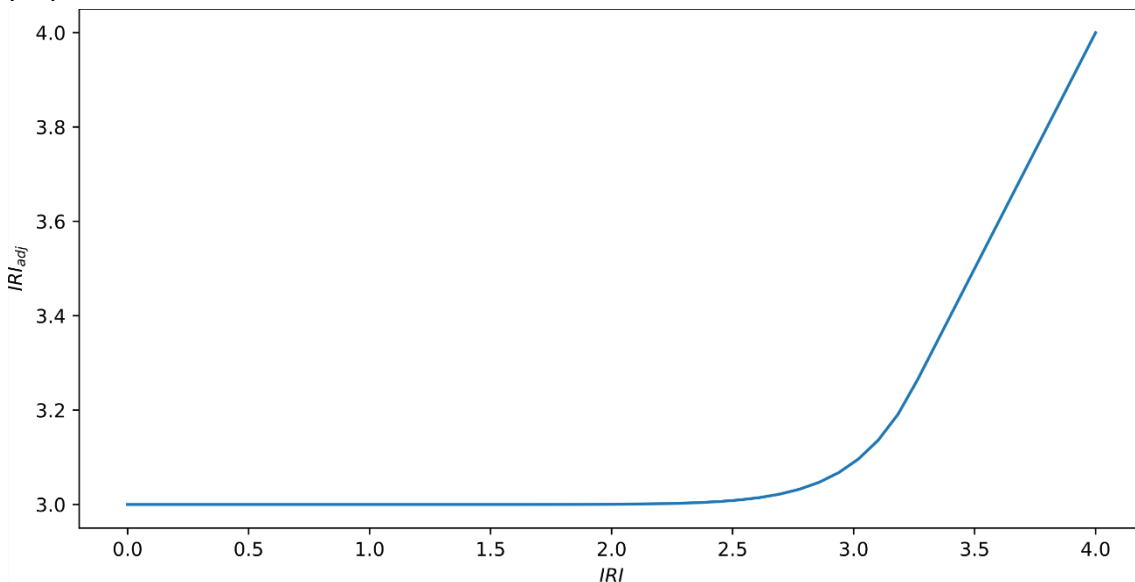
$$RI_0 = RI_{min} + RI_{shape}$$

$$a_2 = \frac{RI_{shape}}{\frac{RI_0}{RI_{shape}}}$$

$$a_3 = \frac{RI_0}{RI_{shape}}$$

RI_{shape} je tvarový faktor (východisková hodnota je 0,25).

Celý na prvý pohľad komplikovaný vzťah (2.1) je len technika, ako urobiť funkciu hladkú pri prechode od konštantného minima:



Priemerný počet najazdených kilometrov počítame:

1. pre metódu konštantnej životnosti vozidla:

$$CKM = \frac{AKM_0 \cdot LIFE_0}{2}$$

kde:

AKM_0 je základný priemerný ročný počet najazdených kilometrov daného typu vozidla [km/rok],

$LIFE_0$ je základná priemerná servisná životnosť daného typu vozidla v rokoch [rok].

- pre metódu optimálnej životnosti vozidla:

$$CKM = \frac{LIFE_{km}}{2}$$

kde:

$LIFE_{km}$ je predpovedaná optimálna životnosť vozidla (t.j. počet kilometrov, pri ktorých sa oplatí vyradiť vozidlo z ekonomických dôvodov) [km]

- pri znalosti vekovej distribúcie vozidiel:

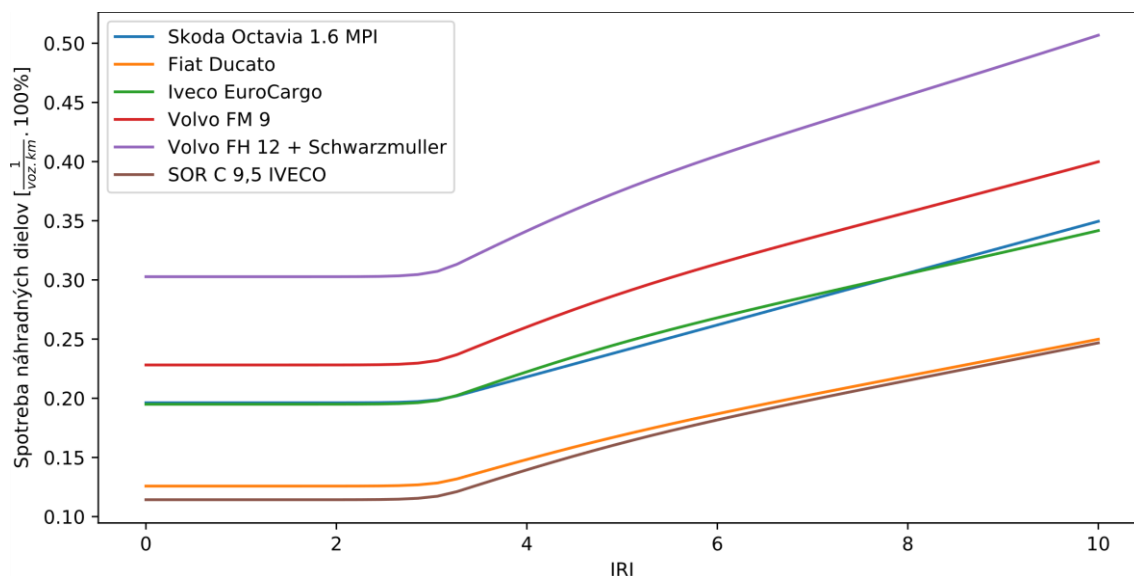
$$CKM = \sum_i^n \frac{AKMV_i \cdot VEHAGE_i \cdot PCTV_i}{100}$$

kde:

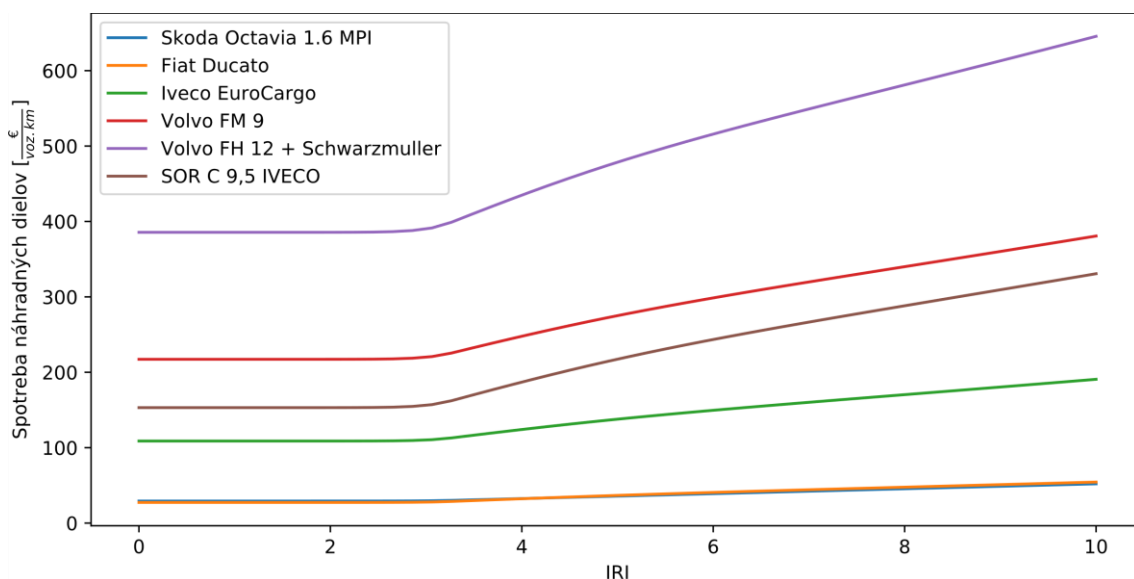
AKM_i je priemerný ročný počet najazdených kilometrov vozidla starého $VEHAGE_i$ rokov,

$VEHAGE_i$ je vek vozidla i ,

$PCTV_i$ je percentuálny podiel vozidiel vo veku $VEHAGE_i$.



Obrázok 17 Spotreba náhradných dielov relatívna k ekonomickej cene nového vozidla na 1000 voz.km vzhľadom na IRI pre flotilu HDM-4 SK



Obrázok 18 Spotreba náhradných dielov na 1000 voz.km vzhľadom na IRI pre flotilu HDM-4 SK (prepočítané z predchádzajúceho s použitím ekonomickej ceny nového vozidla)

2.5.5.3 Náklady na servisné práce v HDM-4

HDM-4 modeluje náklady na servisné práce ako exponenciálnu funkciu spotreby náhradných dielov. Funkcia udáva počet potrebných servisných hodín na 1000 voz.km. Tento počet pri východiskových konštantách rastie približne s druhou odmocninou spotreby náhradných dielov.

$$LH = K_{0lh} \cdot (a_0 \cdot PC^{a_1}) + K_{1lh}$$

kde:

LH je modelovaný počet servisných hodín na 1000 voz.km,

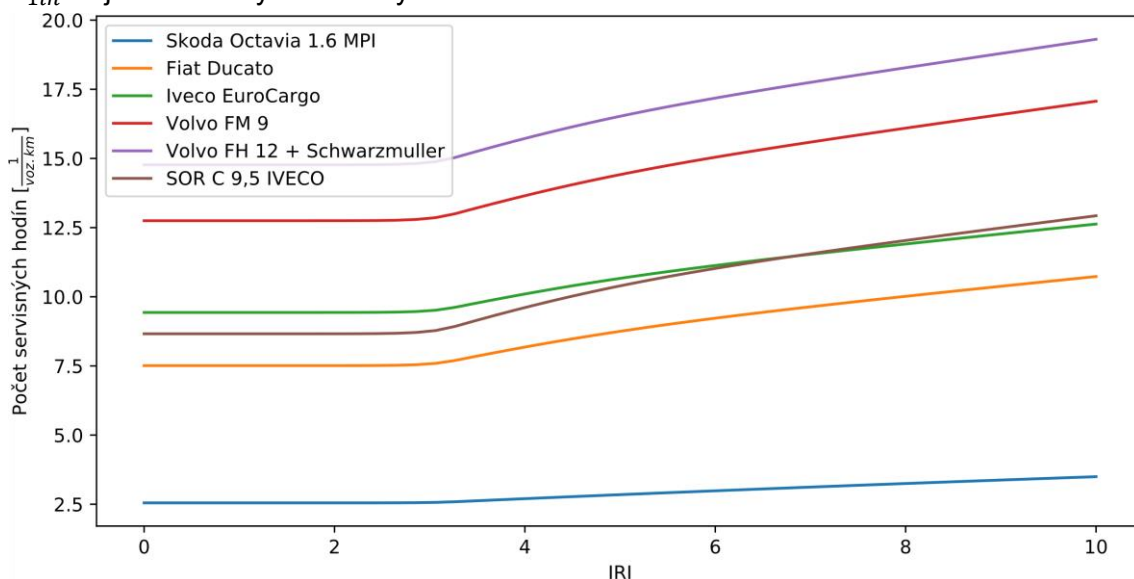
PC je spotreba náhradných dielov na 1000 voz.km ako % z obstarávacej ceny nového vozidla (počíta sa modelom popísaným v 2.5.5.2),

a_0 je konštantný člen modelu (pre osobné vozidlá býva okolo 80, pre nákladné vozidlá okolo 250 – 300),

a_1 je exponenciálny člen modelu (býva okolo 0,5),

K_{0lh} je rotačný kalibračný súčiniteľ modelu,

K_{1lh} je translačný kalibračný súčiniteľ modelu.



Obrázok 19 Počet servisných hodín na 1000 voz.km vzhľadom na IRI pre flotilu HDM-4 SK

2.5.5.4 Záver

Z uvedeného popisu nákladov na údržbu a opravy vozidiel vyplýva, že ich výška závisí od veľkosti IRI. Ich výška je fixná do hodnoty cca 3,0 mm/m (parameter RI_{min}), následne stúpajú takmer lineárne.

2.6 Stratové časy

Vozidlá prispôsobujú rýchlosť svojej jazdy technickému stavu vozovky. Na rýchlosť vplývajú významnejšie niektoré poruchy povrchu vozovky, predovšetkým pozdĺžne nerovnosti vyvolávajúce nepríjemné vibrácie vozidla. Vyjazdené koľaje môžu mať tiež vplyv na rýchlosť vozidiel, obzvlášť keď sú príliš hlboké a hlavne za mokra. Naopak, niektoré poruchy majú len malý vplyv na rýchlosti, ako sú trhliny alebo straty drsnosti, ktoré vodiči väčšinou nevnímajú.

Rozdiel medzi jazdnou rýchlosťou na vozovke s daným poškodením jej povrchu a na vozovke v technickom dokonalom stave nazývame **stratová rýchlosť z dôvodu technického stavu vozovky** (skrátene ďalej **stratová rýchlosť**). Tento pokles jazdnej rýchlosti znamená časové oneskorenie pri prejazde úseku a časový rozdiel z toho vyplývajúci nazývame **stratový čas** vyvolaný z dôvodu technického stavu vozovky.

Je zrejmé, že na výpočet stratových časov potrebujeme vypočítať stratové rýchlosti, teda spočítať jazdné rýchlosti pri danom zhoršenom technickom stave vozovky a na dokonalej vozovke.

2.6.1 Model voľných rýchlostí v HDM-4

Voľná rýchlosť je rýchlosť, ktorou vozidlá jazdia na danom úseku cesty, pokiaľ nie sú ovplyvňované inými vozidlami. Pri výpočte sa uvažujú parametre cesty samotnej, ale nie vzájomné interakcie s inými vozidlami. Touto rýchlosťou jazdia teda v praxi vozidlá pri veľmi nízkych intenzitách dopravy.

Voľná rýchlosť vozidla sa v HDM-4 modeluje tzv. *pravdepodobnostne limitujúcim rýchlostným modelom*. Na rozdiel od jednoduchšieho rýchlostného modelu, v ktorom je voľná rýchlosť minimom z jednotlivých limitujúcich rýchlostí, tento model produkuje hladké rýchlostné krivky a priznáva spolupôsobenie jednotlivých limitujúcich faktorov na výslednú rýchlosť (napr. vozidlo idúce v klesajúcej zákrute na vozovke s pozdĺžnymi nerovnosťami pravdepodobne spomalí svoju rýchlosť pod minimum z jednotlivých limitujúcich rýchlostí vyplývajúcich z klesania, zákruty a pozdĺžnych nerovností).

Vzťah na výpočet voľnej rýchlosti z limitujúcich rýchlostí je nasledujúci:

$$V_{SS} = \frac{e^{\frac{\sigma^2}{2}}}{\left((V_{DRIVE})^{\frac{1}{\beta}} + (V_{BRAKE})^{\frac{1}{\beta}} + (V_{CURVE})^{\frac{1}{\beta}} + (V_{ROUGH})^{\frac{1}{\beta}} + (V_{DESIR})^{\frac{1}{\beta}} \right)^{\beta}}$$

kde:

V_{SS} je voľná rýchlosť vozidla [m/s],

V_{DRIVE} je limitujúca rýchlosť z pozdĺžneho sklonu a výkonu vozidla [m/s],

V_{BRAKE} je limitujúca rýchlosť kvôli brzdeniu v klesaniach (v stúpaniach kladieme $+\infty$) [m/s],

V_{CURVE} je limitujúca rýchlosť pri prejazde zákrutou [m/s],

V_{ROUGH} je limitujúca rýchlosť kvôli pozdĺžnej nerovnosti [m/s],

V_{DESIR} je limitujúca požadovaná rýchlosť [m/s].

Parameter σ má v HDM-4 hodnotu 0, teda v čitateli zlomku pre výpočet V_{SS} sa nachádza číslo 1. Parameter β má rôzne hodnoty pre rôzne typy vozidiel. Ovplyvňuje tvar krivky V_{SS} a vzdialenosť od jednotlivých limitujúcich rýchlostí (čím bližšie k 0, tým bližšie bude V_{SS} k najmenšej limitujúcej rýchlosti).

Nasledujúce kapitoly stručne popisujú výpočet veľkostí jednotlivých limitujúcich rýchlostí.

2.6.1.1 Limitujúca rýchlosť z pozdĺžneho sklonu a výkonu vozidla V_{DRIVE}

Potrebný jazdný výkon vozidla na (horizontálne) rovnom úseku s daným pozdĺžnym sklonom pri rýchlosti vozidla v , teda uvažovaní aerodynamického odporu F_a , odporu proti valeniu F_r a odporu z pozdĺžneho sklonu F_g , je:

$$P_d = \frac{v \cdot (F_a + F_r + F_g)}{1000}$$

čo rozpísaním jednotlivých odporových síl vedie vzhľadom na rýchlosť na kubickú rovnicu pri danom maximálnom jazdnom výkone vozidla $P_{d,max}$:

$$1000 \cdot P_{d,max} = z_0 \cdot V_{DRIVE} + z_1 \cdot (V_{DRIVE})^3$$

kde z_0 a z_1 sú funkcie odporových síl F_a , F_r a F_g .

Jazdný výkon je nižší ako menovitý výkon motora (ktorý motor dosahuje len v istom bode otáčok; navyše sú odpočítané straty na hnacom ústrojenstve).

Limitujúcu rýchlosť V_{DRIVE} počítame zvlášť pre stúpanie (kladný pozdĺžny sklon) a zvlášť pre klesanie (záporný pozdĺžny sklon). Pri výpočte voľnej rýchlosti sa jej účinky prejavajú len pri stúpaniach a veľmi miernych klesaniach (kde na prekonanie odporu vzduchu a odporu proti valeniu nepostačuje záporná F_g a je potrebné ich prekonať motorom).

Na hodnotu tejto limitujúcej rýchlosti má vplyv hodnota IRI a MPD cez veľkosť valivého odporu F_r .

2.6.1.2 Limitujúca rýchlosť kvôli brzdeniu v klesaní V_{BRAKE}

Limitujúca rýchlosť V_{BRAKE} sa kladie $+\infty$ pre stúpania (nie je potrebné brzdiť, a teda ani limitovať rýchlosť).

Analogickým uvažovaním ako pri výpočte V_{DRIVE} , avšak pre rovnováhu dostupného brzdného výkonu vozidla P_{BRAKE} a požadovanej brzdnéj sily $F_{BRAKE} = F_g - F_r - F_a$ (odpor proti valeniu a odpor vzduchu pri brzdení pomáhajú a majú preto záporné znamienko), dospejeme ku kubickej rovnici:

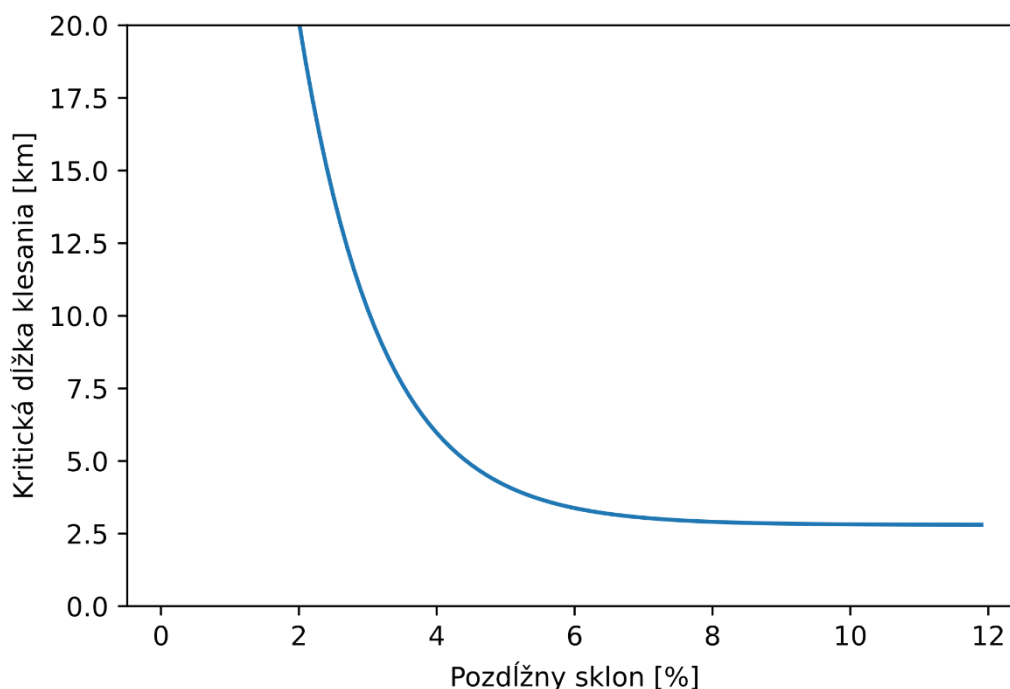
$$-1000 \cdot P_{BRAKE} = z_0 \cdot (V_{BRAKE})^3 + z_1 \cdot V_{BRAKE}$$

kde:

P_{BRAKE} je brzdný výkon vozidla [kW],

z_0 , z_1 sú funkcie odporových síl F_g , F_r a F_a (po ich rozpísaní do kubického tvaru vzhľadom na V_{BRAKE}).

Počíta len na klesaniach dlhších ako tzv. kritická dĺžka klesania, ktorá sama o sebe je funkciou pozdĺžneho sklonu:



Obrázok 20 Kritická dĺžka klesania od pozdĺžneho sklonu

Pri klesaniach kratších ako 2,8 km sa neuvažuje limitujúca rýchlosť V_{BRAKE} bez ohľadu na veľkosť pozdĺžneho sklonu.

Na hodnotu tejto limitujúcej rýchlosti má vplyv hodnota IRI a MPD cez veľkosť valivého odporu F_r .

2.6.1.3 Limitujúca rýchlosť kvôli zákrutám V_{CURVE}

Vodiči jazdiaci v zákrute znižujú svoju rýchlosť na zabezpečenie dostatočného bočného trenia pre bezpečný prejazd zákrutou bez šmyku. Dá sa rozumne predpokladať, že ostrejšie zákruty (menší polomer krivosti) budú mať väčší vplyv na limitujúcu rýchlosť, ako jemné a tiahle zákruty (väčší polomer krivosti).

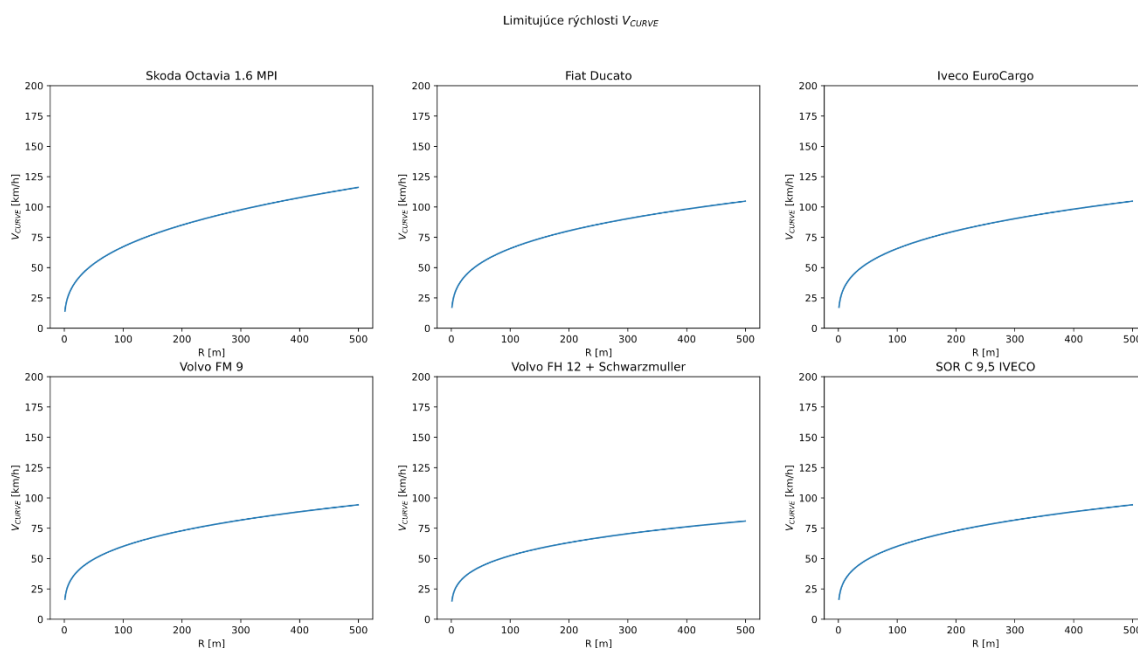
HDM-4 používa jednoduchý vzťah odvodený v Austrálii podľa McLeana:

$$V_{CURVE} = a_0 \cdot R^{a_1}$$

kde R je polomer krivosti zákruty [m] a a_0 a a_1 sú regresné parametre pre daný typ vozidla.

V modeli sa nevyužíva počiatočná rýchlosť prichádzajúceho vozidla do zákruty, hoci sa v praxi ukazuje, že má na výslednú rýchlosť v zákrute tiež vplyv.

Hodnota tejto limitujúcej rýchlosti nezávisí od aktuálneho technického stavu vozovky.



Obrázok 21 Závislosť limitujúcej rýchlosti V_{CURVE} od polomeru zákruty R pre vozidlovú flotilu HDM-4 SK

2.6.1.4 Limitujúca rýchlosť kvôli pozdĺžnej nerovnosti V_{ROUGH}

Pozdĺžne nerovnosti vozovky indukujú vibračné pohyby karosérie vozidla, ktoré nie sú pre posádku príjemné. Z tohto dôvodu vodiči pri značných nerovnostiach znižujú rýchlosti.

Základný uvažovaný parameter je tzv. priemerná rektifikovaná rýchlosť ARV , čo je kumulatívny súčet absolútnych výchyliek tuhej zadnej nápravy referenčného vozidla na jednotku času [mm/s].

Medzi ARV a rýchlosťou vozidla v a IRI existuje nasledovný vzťah [18]:

$$ARV = 1,15 \cdot v \cdot IRI$$

Hodnota 1,15 je konštanta úmernosti spôsobená použitou referenčnou sústavou pri definícii ARV (Chevrolet Opala s odozovým zariadením na meranie pozdĺžnych nerovností Maysmeter).

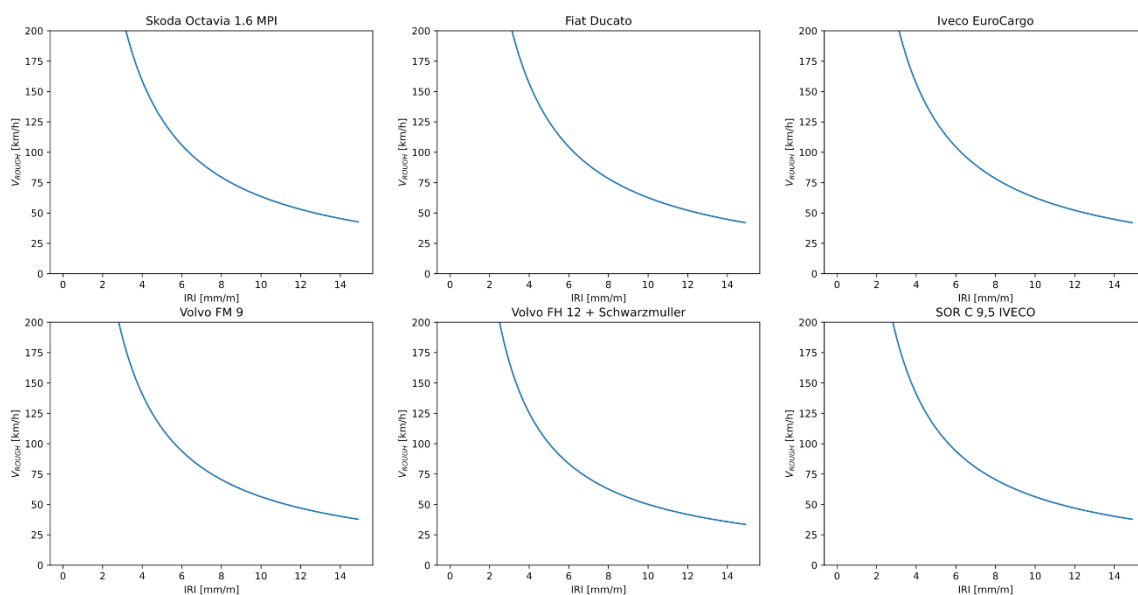
Pre každý typ vozidla v závislosti od jeho pružiacich charakteristík je daná maximálna prijateľná hodnota ARV označená ako ARV_{MAX} . Modernejšie a ľahšie vozidlá ju majú väčšiu ako staršie a ťažšie vozidlá.

Potom limitujúcu rýchlosť kvôli pozdĺžnej nerovnosti dokážeme určiť jednoduchou úpravou vyššie uvedeného vzťahu:

$$V_{ROUGH} = \frac{ARV_{MAX}}{1,15 \cdot IRI}$$

Zrejmý hyperbolický vzťah medzi IRI a V_{ROUGH} ilustrujú nasledovné grafy:

Limitujúce rýchlosti V_{ROUGH}



Obrázok 22 Závislosť limitujúcej rýchlosti V_{ROUGH} od IRI pre vozidlovú flotilu HDM-4 SK

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené hodnoty IRI pre vozidlovú flotilu HDM-4 SK, ktoré zodpovedajú daným veľkostiam limitujúcej rýchlosti V_{ROUGH} :

Limitujúca rýchlosť V_{ROUGH} [km/h] →	150	130	90	50
Vozidlo ↓				
Skoda Octavia 1.6 MPI	4,2	4,9	7,1	12,7
Fiat Ducato	4,2	4,8	7,0	12,5
Iveco EuroCargo	4,2	4,8	7,0	12,5
Volvo FM 9	3,8	4,3	6,3	11,3
Volvo FH 12 + Schwarzmuller	3,3	3,9	5,6	10,0
SOR C 9,5 IVECO	3,8	4,3	6,3	11,3

Z grafu a tabuľky, je vidno, že vplyv IRI na limitujúcu rýchlosť sa začína prejavovať až pri relatívne vyšších hodnotách IRI vzhľadom na pomery slovenskej diaľničnej siete a siete ciest I. tried. Pravdepodobnostná formulácia rýchlostného modelu pre V_{SS} však zabezpečí, že istý vplyv na rýchlosť sa začne prejavovať aj, keď ostatné limitujúce rýchlosti budú nižšie ako V_{ROUGH} .

Z definície tejto limitujúcej rýchlosti vyplýva, že ju zásadne ovplyvňuje hodnota IRI .

2.6.1.5 Požadovaná rýchlosť V_{DESIR}

Požadovaná rýchlosť uvažuje všetky ostatné faktory na ceste eliminujúc tie počítané v limitujúcich rýchlostiach uvedených vyššie. Ide teda o rýchlosť, ktorou by vodič šiel sám na rovnom (vertikálne aj horizontálne) úseku s vozovkou vo výbornom technickom stave. Z definície je zrejmé, že stav vozovky nemá na jej veľkosť žiadny vplyv.

HDM-4 tu uvažuje:

- šírku vozovky a počet pruhov,
- prekážky plynulosti premávky (angl. „roadside friction“, napr. autobusové zastávky, parkovanie vozidiel, vjazdy a výjazdy vozidiel k príľahlým nehnuteľnostiam, ...) a nemotorizovaná doprava (chodci, bicyklisti, ...),
- rýchlostné limity dané legislatívou alebo dopravným značením.

Každý typ vozidla má danú tzv. základnú požadovanú rýchlosť na dvojpruhových cestách so štandardnou šírkou ($CW2 = 6,8$ m), označenú ako V_{DES2} . Táto rýchlosť sa koriguje:

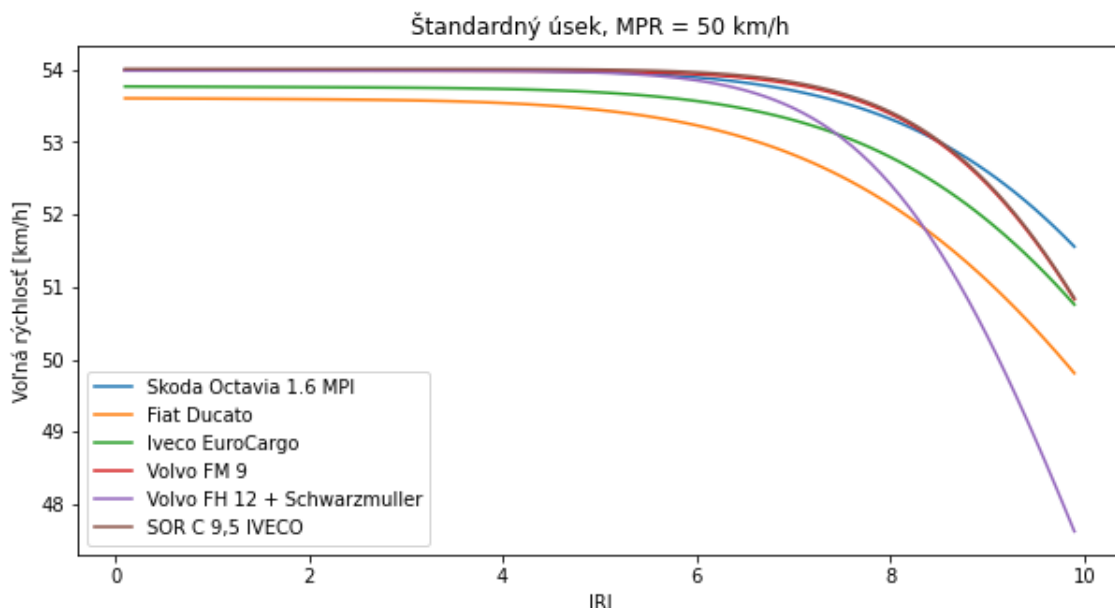
- na vozovkách so šírkou menšou alebo rovnou minimálnej šírke jednopruhovej cesty ($CW1 = 4$ m) sa redukuje konštantnou ($a_2 = 0,75$), výsledná rýchlosť sa označuje ako V_{MIN} ,
- na vozovkách medzi šírkami $CW1$ a $CW2$ sa použije lineárna interpolácia medzi V_{MIN} a V_{DES} ,
- na širších vozovkách až do istej šírky $CW3$ rastie lineárne základná požadovaná rýchlosť od V_{DES2} so smernicou 2,9 m/s/m pre osobné vozidlá a ľahšie vozidlá, 0,7 m/s/m pre nákladné vozidlá a 0,6 m/s/m pre veľmi ťažké nákladné vozidlá,
- na vozovkách širších ako $CW3$ sa už neprejavuje súvis rýchlosti so šírkou vozovky.

Základná požadovaná rýchlosť sa násobí súčiniteľmi redukcie rýchlostí pre prekážky plynulosti premávky a nemotorizovanú dopravu. Pokiaľ je výsledná rýchlosť vyššia ako maximálna povolená rýchlosť na úseku násobená súčiniteľom jej dodržiavania (implicitná hodnota 1,0), použije sa maximálna povolená rýchlosť.

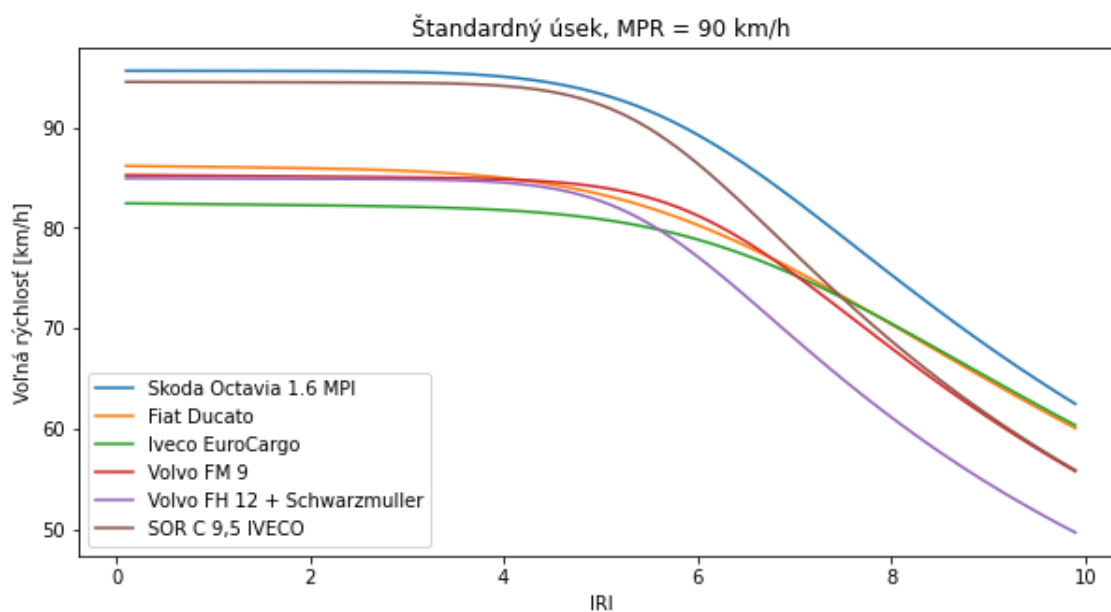
Ako posledný krok sa výsledná rýchlosť násobí súčiniteľom kategórie (triedy) cesty, ktorý zohľadňuje to, že uvedený model je pripravený pre dvojpruhové cesty (typické cesty I. triedy).

2.6.2 Analýza modelu HDM-4

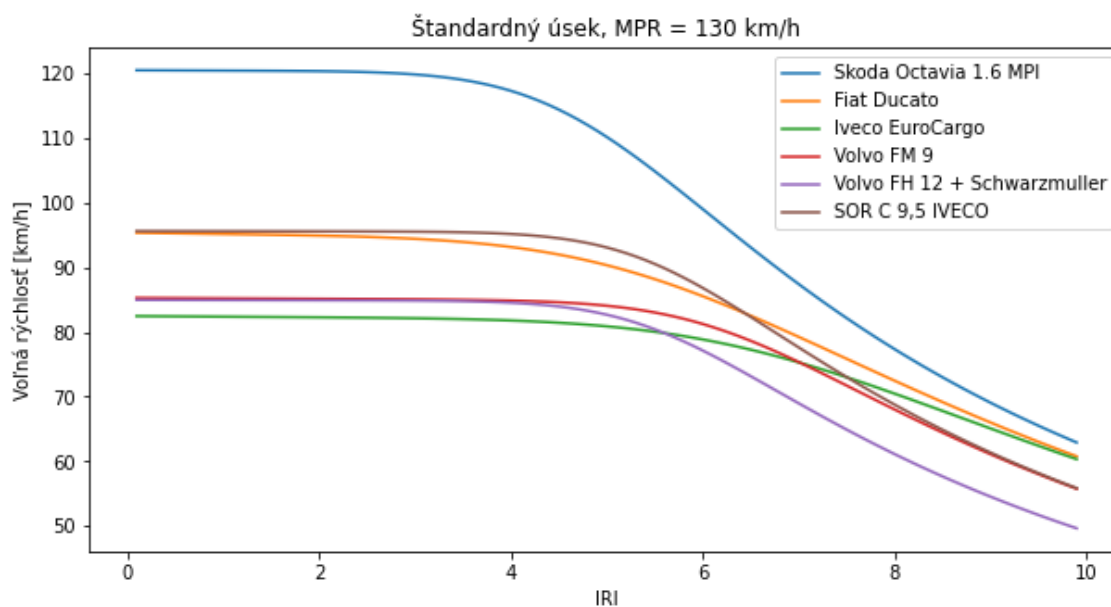
Závislosť veľkosti voľnej rýchlosti od IRI je vďaka jej priamemu aj nepriamemu použitiu pomerne komplikovaná. Na nasledujúcich grafoch sú zobrazené tieto závislosti:



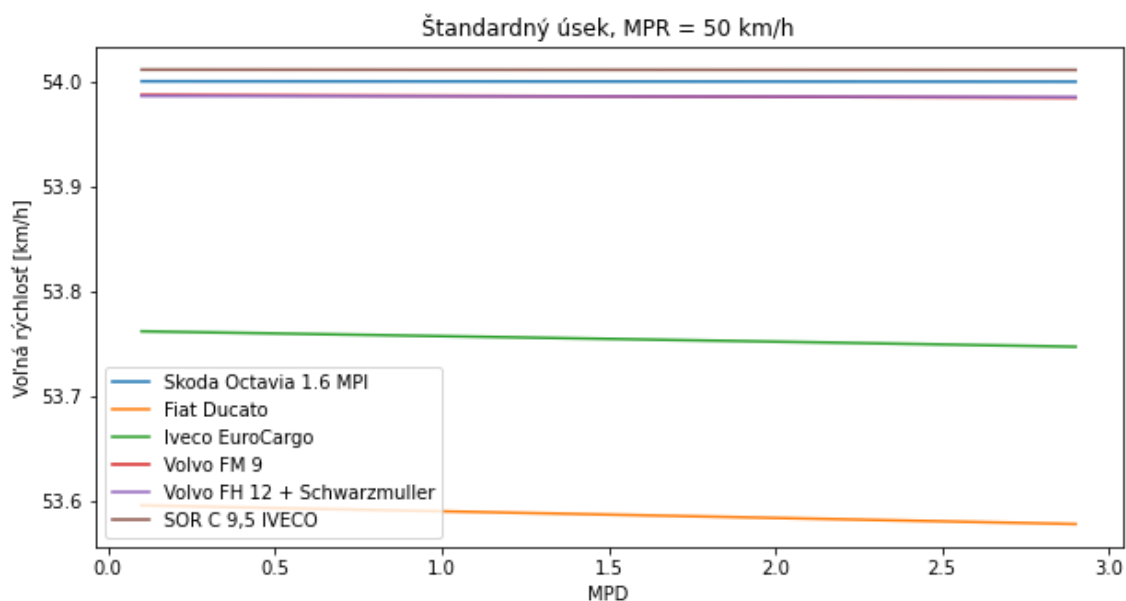
Obrázok 23 Závislosť voľnej rýchlosti od IRI na rovnom úseku v rovine pri MPR 50 km/h



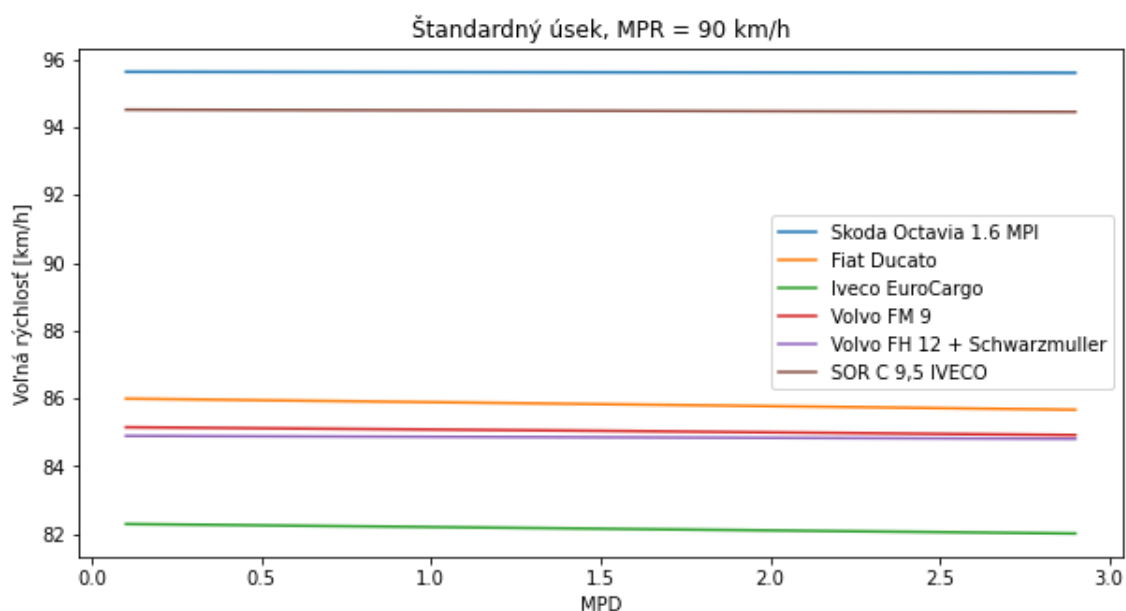
Obrázok 24 Závislosť voľnej rýchlosti od IRI na rovnom úseku v rovine pri MPR 90 km/h



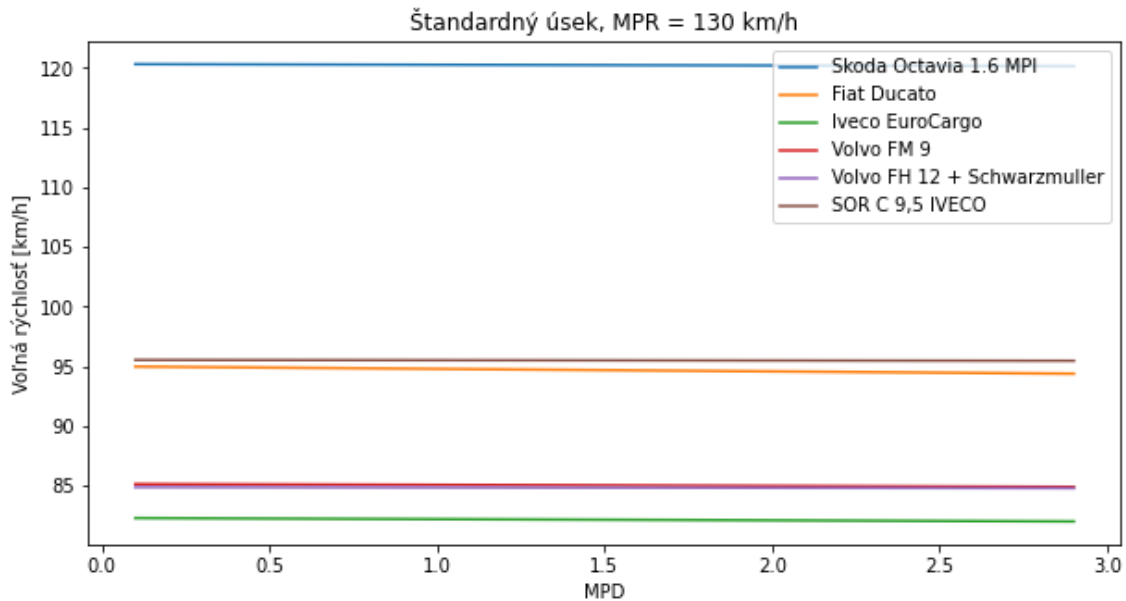
Obrázok 25 Závislosť voľnej rýchlosti od IRI na rovnom úseku v rovine pri MPR 130 km/h



Obrázok 26 Závislosť voľnej rýchlosti od MPD na rovnom úseku v rovine pri MPR 50 km/h



Obrázok 27 Závislosť voľnej rýchlosti od MPD na rovnom úseku v rovine pri MPR 90 km/h



Obrázok 28 Závislosť voľnej rýchlosti od MPD na rovnom úseku v rovine pri MPR 130 km/h

2.6.3 Výpočet nákladov na stratové časy

Model časových nákladov HDM-4 uvažuje s:

- časom pasažierov – čas pasažierov strávený cestou pri preprave osôb,
- časom prepravy nákladu.

Čas pasažierov v h/1000/voz/km pri rýchlosti v je:

$$PHX = 1000 \cdot \frac{PAX}{v}$$

kde PAX je počet pasažierov.

Vozidlá prepravujúce pasažierov majú určený podiel služobných ciest w v %. Potom časové náklady pasažierov v €/1000/voz/km sú:

$$TC_{PASS} = PHX \cdot \left(\frac{W}{100} \cdot EUC_{WORK} + \left(1 - \frac{W}{100} \right) \cdot EUC_{NONWRK} \right)$$

kde:

EUC_{WORK} je jednotková ekonomická cena času pasažiera na pracovnej ceste [€/h],

EUC_{NONWRK} je jednotková ekonomická cena času pasažiera na súkromnej ceste [€/h].

Čas prepravy nákladu v h/1000/voz/km pri rýchlosti v je:

$$CRH = \frac{1000}{v}$$

Časové náklady prepravy tovaru v €/1000/voz/km potom sú:

$$TC_{CARGO} = CRH \cdot EUC_{CARGO}$$

kde:

EUC_{CARGO} je jednotková ekonomická cena prepravy materiálu [€/h].

Celkové časové náklady sú:

$$TC = TC_{PASS} + TC_{CARGO}$$

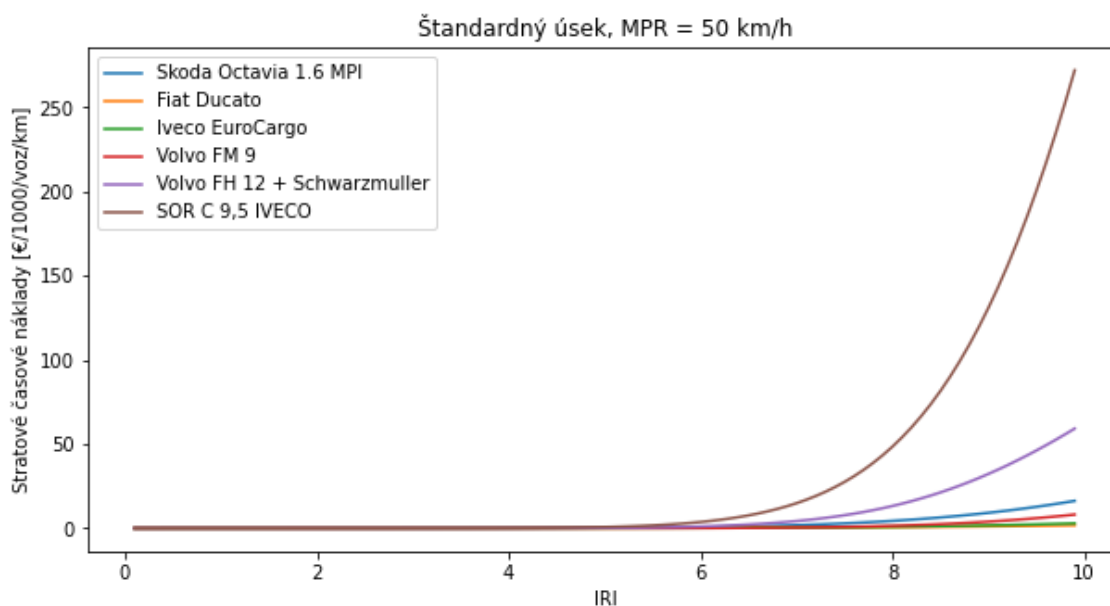
Stratové časové náklady z dôvodu technického stavu vozovky sú potom rozdiel medzi časovými nákladmi v aktuálnom stave vozovky s a základnom stave vozovky 0:

$$dTC(s) = TC(s) - TC(0)$$

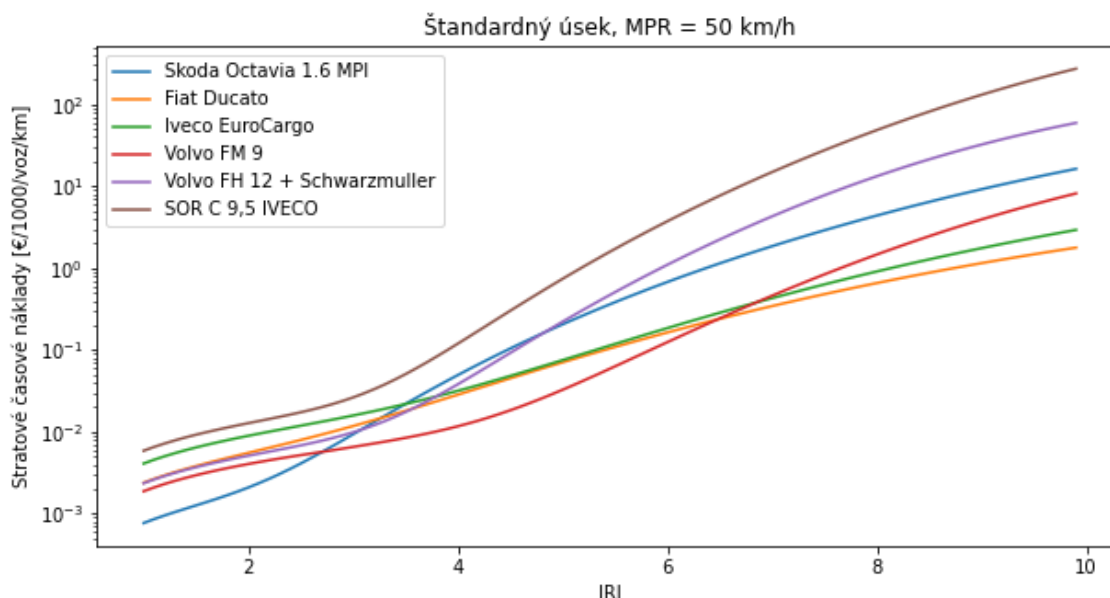
Základný stav vozovky z hľadiska stratových časových nákladov by mal byť taký stav vozovky, pri ktorom sú časové náklady najnižšie. Z definície modelu vyplýva, že ide o vozovku s $IRI = 0$ mm/m a $MPD = 0$ mm.

MPD vstupuje do modelu cez valivý odpor a ten pre minimálne časové náklady by mal byť čo najnižší. To je však problém, pretože určitá minimálna hĺbka makrotextúry je potrebná pre zabezpečenie protišmykových vlastností. Tento problém bude rozobraný ďalej.

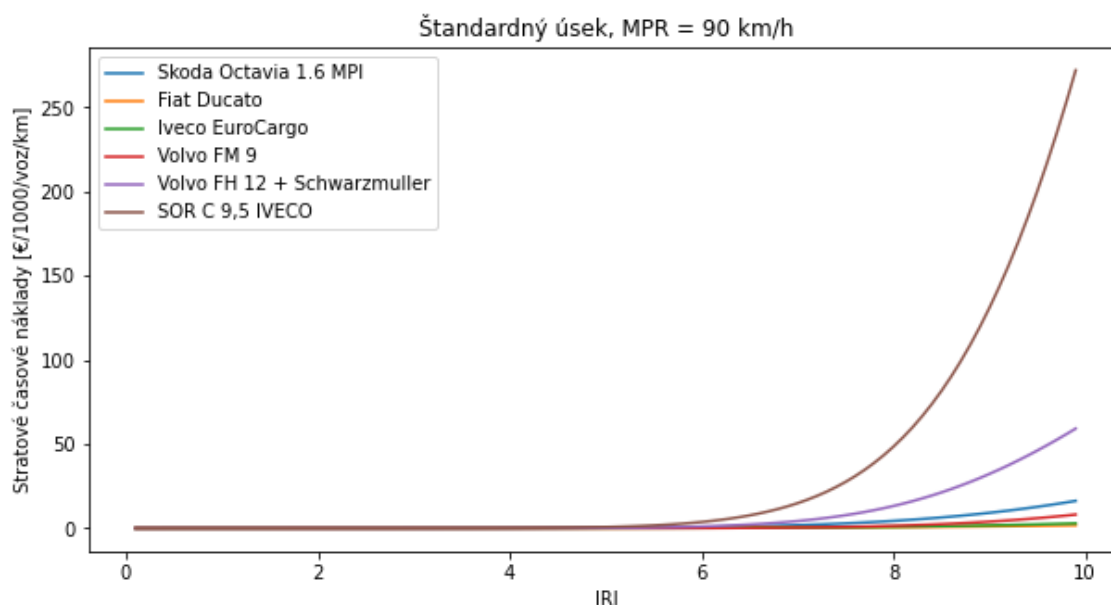
Stratové časové náklady v závislosti od IRI a MPD na štandardnom rovnom úseku pri rôznych povolených rýchlostiach ilustrujú nasledovné grafy:



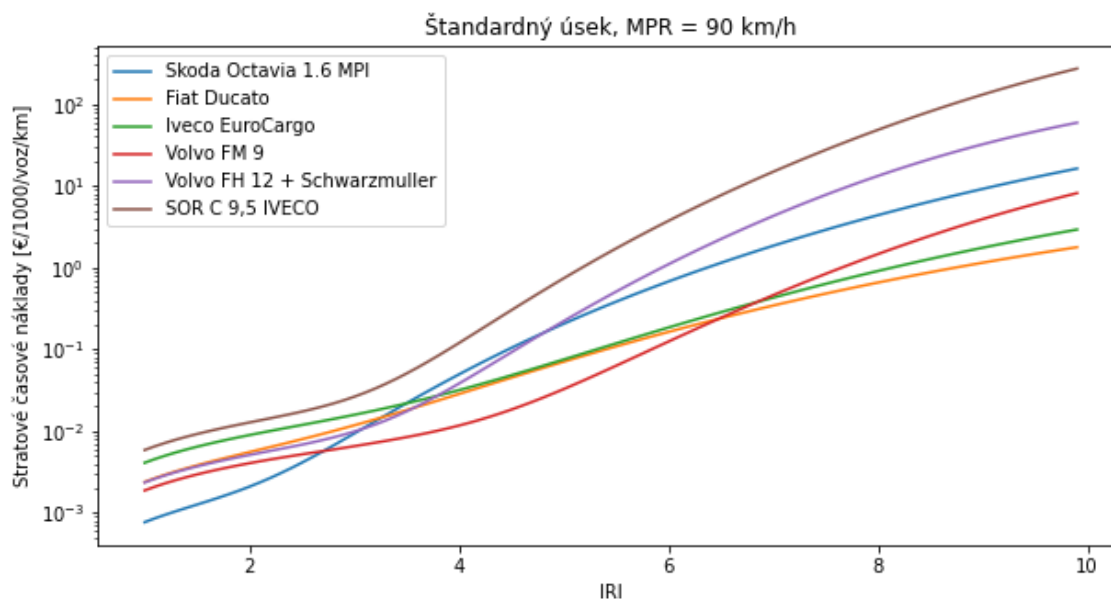
Obrázok 29 Závislosť nákladov na stratové časy od IRI pre štandardný rovný úsek pri $MPR = 50$ km/h



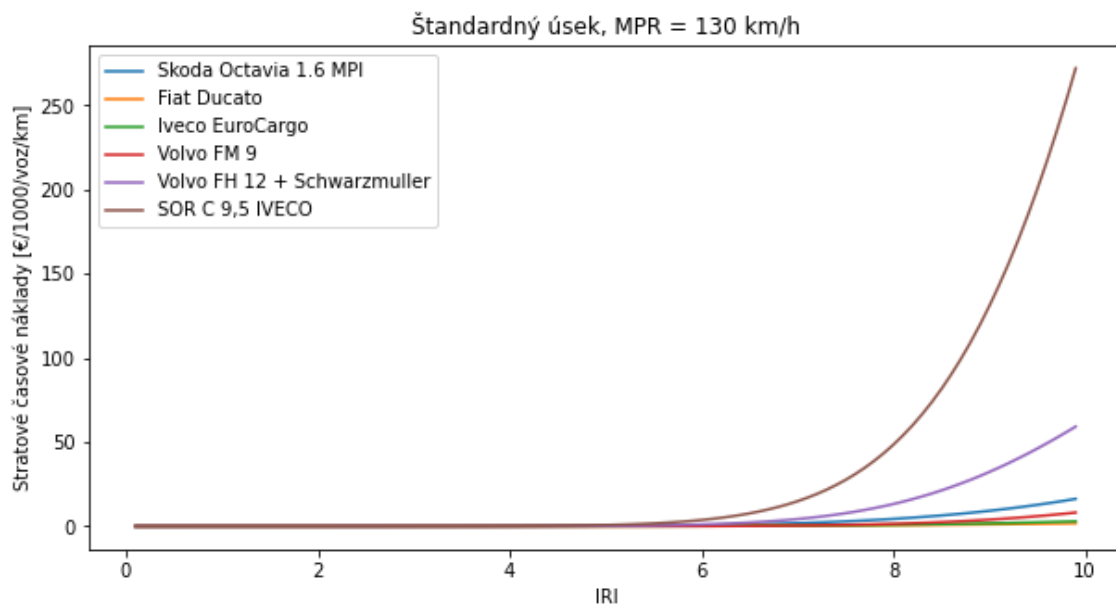
Obrázok 30 Závislosť nákladov na stratové časy od IRI pre štandardný rovný úsek pri $MPR = 50$ km/h (logaritmická os y)



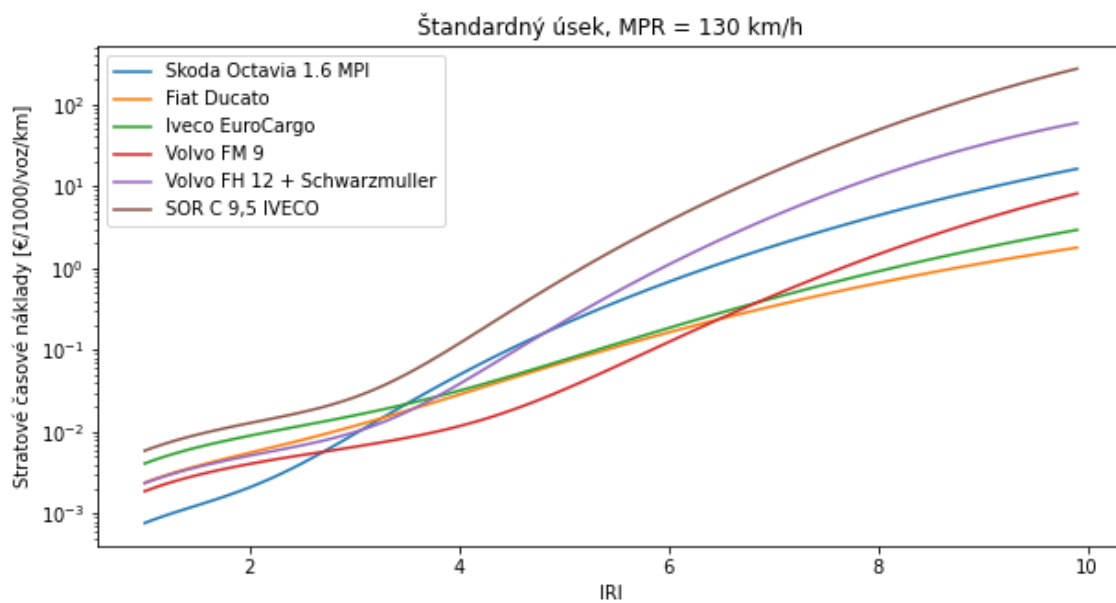
Obrázok 31 Závislosť nákladov na stratové časy od IRI pre štandardný rovný úsek pri MPR = 90 km/h



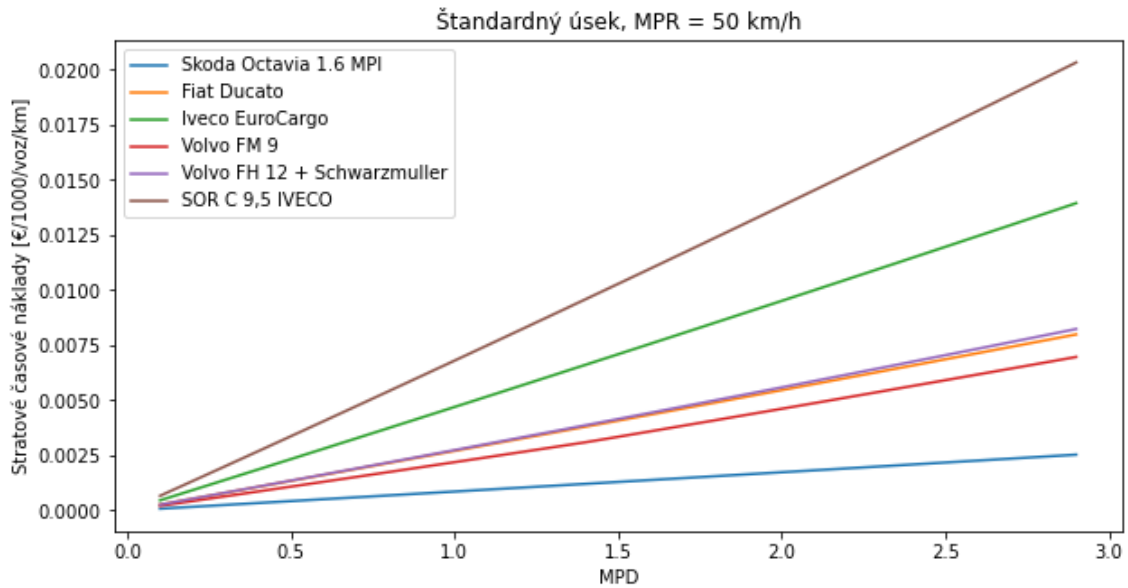
Obrázok 32 Závislosť nákladov na stratové časy od IRI pre štandardný rovný úsek pri MPR = 90 km/h (logaritmická os y)



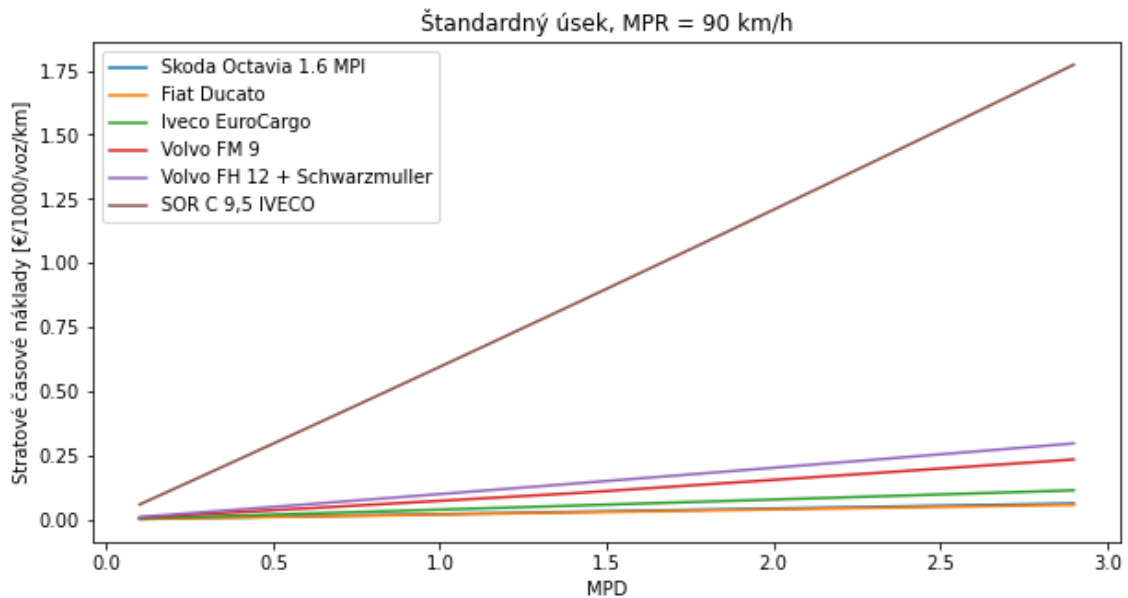
Obrázok 33 Závislosť nákladov na stratové časy od IRI pre štandardný rovný úsek pri MPR = 130 km/h



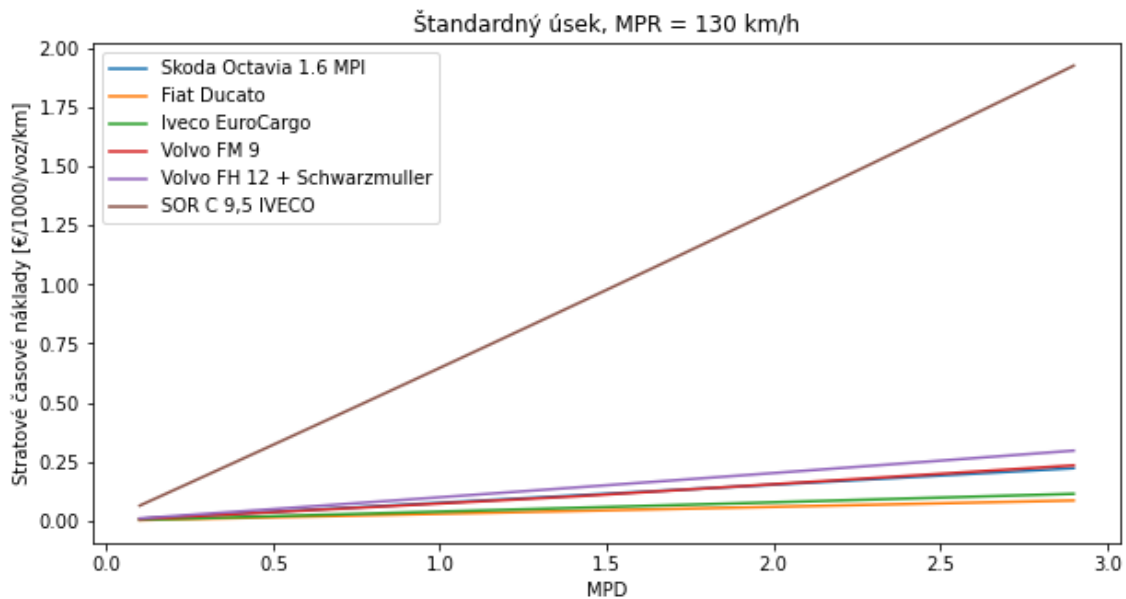
Obrázok 34 Závislosť nákladov na stratové časy od IRI pre štandardný rovný úsek pri MPR = 130 km/h (logaritmická os y)



Obrázok 35 Závislosť nákladov na stratové časy od MPD pre štandardný rovný úsek pri MPR = 50 km/h



Obrázok 36 Závislosť nákladov na stratové časy od MPD pre štandardný rovný úsek pri MPR = 90 km/h



Obrázok 37 Závislosť nákladov na stratové časy od MPD pre štandardný rovný úsek pri MPR = 130 km/h

2.7 Emisie

2.7.1 Všeobecne o emisiách generovaných cestnou dopravou

Emisie generované cestnou dopravou z hľadiska zaťaženia ovzdušia sú predovšetkým:

- **oxid uhličitý** (CO_2), ktorý ako silný skleníkový plyn má významný globálny efekt na zvyšovanie priemerných teplôt atmosféry; objem exhalovaného CO_2 je hlavný indikátor emisií skleníkových plynov; je to jeden z hlavných produktov dokonalého spaľovania fosílnych palív,
- **oxidy dusíka** (NO_x): oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2), majúce nepriaznivý vplyv na ľudské zdravie (lokálny efekt), spôsobujúce kyslé dažde, eutrofizáciu vôd, letný (fotochemický) smog a v kombinácii s uhlíkovodíkmi produkujú prízemný ozón ako sekundárny polutant,
- **jemné tuhé látky** (PM_x) majúce nepriaznivý vplyv na ľudské zdravie (lokálny efekt); vznikajú spaľovaním hlavne v dieselových motoroch a benzínových motoroch s priamym vstrekaním paliva (GDI); ide hlavne o tuhé látky s priemerom menším ako $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$). Jemné tuhé látky vznikajúce iným spôsobom (napr. abrázia mechanickým opotrebovaním brzdových platničiek, pneumatík a vozovky) neuvažujeme,¹⁰
- **oxid uhoľnatý** (CO) – jedovatý plyn a prekursor prízemného ozónu; produkt čiastočnej oxidácie uhlíka pri nedokonalom spaľovaní fosílného paliva. V minulosti benzínové motory boli jeho najväčším zdrojom, dnes však už cestná doprava prispieva len málo k jeho exhalácii vďaka veľmi skoro zavedeným emisným limitom,
- **uhlíkovodíky** (HC) – uvoľňujú sa nedokonalým spaľovaním fosílnych palív a niektoré prchavé uhlíkovodíky aj priamym vyparovaním benzínu. Patria sem:
 - prchavé uhlíkovodíky (skr. VOC alebo nemetánové uhlíkovodíky – NMHC) – spôsobujúce letný (fotochemický) smog; v kombinácii s NO_x vytvárajú prízemný ozón ako sekundárny polutant. Niektoré

¹⁰ Niektoré prístupy k modelovaniu nevýfukových emisií PM sa dajú nájsť napr. v [49].

z nich sú aj sami o sebe jedovaté a karcinogénne (napr. benzén, toluén, xylén, formaldehyd),

- metán (CH_4) – po vodnej pare a oxide uhličitom ide o tretí najvýznamnejší skleníkový plyn, avšak v porovnaní s CO_2 sú vplyvy emisií metánu z cestnej dopravy len málo významné,
- **amoniak** (NH_3) – jedovatý plyn, ktorý sa môže exhalovať ako nežiaduci vedľajší produkt pri použití selektívnej katalytickej redukcie s využitím vodného roztoku močoviny (AdBlue) v dieselových motoroch (aftertreatment). V rámci systému Euro emisných štandardov sa začal sledovať až v triede Euro VI pre ťažké nákladné vozidlá,
- **olovo** (Pb) – neurotoxický ťažký kov, ktorého zlúčeniny (tetraetylolovo) majú schopnosť eliminovať klepanie motora,
- **oxid siričitý** (SO_2) – vzniká spaľovaním palív s prítomnými sírnymi zložkami. Ide o jedovatý plyn s potenciálom vzniku kyslých dažďov po oxidácii na kyselinu sírovú (H_2SO_4).

Podstatná časť emisií má povahu výfukových emisií, teda látok vznikajúcich pri spaľovaní palív a uvoľnených výfukovým systémom do voľného ovzdušia. Motorové vozidlá spaľujúce benzín majú tendenciu uvoľňovať aj tzv. evaporatívne emisie, čo sú ľahké prchavé zložky benzínov unikajúce priamo z paliva bez jeho spálenia rôznymi mechanizmami. Vzhľadom na to, že moderné vozidlá disponujú systémami eliminujúcimi evaporatívne emisie a predovšetkým, že ich objem nezávisí od technického stavu vozovky, budeme sa ďalej zaoberať len výfukovými emisiami. V prípade potreby je možné nájsť modely evaporatívnych emisií napríklad v modeli COPERT [19].

Z hľadiska celkových podielov na znečistení ovzdušia v súčasnosti má cestná doprava významný podiel na prvých piatich polutantoch, teda CO_2 , NO_x , PM_x , CO a HC [20]. Predpokladá sa, že rozširovaním vznetrových motorov s aftertreatmentom použitím močoviny bude rásť objem emitovaného amoniaku a v budúcnosti ho bude potrebné sledovať. Olovnaté benzíny sa už v EÚ v cestnej doprave nepoužívajú (používajú ich už len tri krajiny – Irak, Jemen a Alžírsko [21]). Podobne sa v cestnej doprave v EÚ používajú od roku 2009 výhradne tzv. bezsírne benzínové a dieselové palivá (< 10 ppm síry). Z týchto dôvodov nie je potrebné modelovať a sledovať hladiny emisií olova a oxidu siričitého.

2.7.2 Emisné modely

Emisný model popisuje matematické vyjadrenie množstva uvoľnených emisií. V literatúre je popísaných a v praxi používaných niekoľko emisných modelov. Okrem iného sa odlišujú od seba úrovňou časovej agregácie – mikroskopické modely predikujú okamžitý objem emisií jednotlivého vozidla (alebo typického zástupného vozidla) na základe okamžitých podmienok jazdy charakterizovaných sekundovými dátami o rýchlosti, akcelerácii, polohe a podmienok jazdy; mezoskopické a makroskopické modely predikujú údaje vzhľadom na agregované údaje jazdných prúdov.

Pre účely strategického reportingu stavu vozoviek sú dôležité modely, ktoré dokážu modelovať objem emisií na základe parametrov cesty, vrátane technického stavu vozovky. Na tento účel nie sú použiteľné emisné modely počítajúce emisie z pevných jazdných režimov, ktoré sa používajú pre hodnotenie a vzájomné porovnávanie vozidiel medzi sebou z hľadiska emisnej stopy pri prevádzke.

2.7.3 Emisný model HDM-4

HDM-4 modeluje nasledovné emisie: HC, CO, NO_x , PM, CO_2 , SO_2 a Pb. V súlade s textom vyššie rozoberieme len modelovanie prvých päť polutantov.

Emisný model všetkých emisií okrem CO₂ je založený na práci Dr. Fenga Ana a kolektívu popísaného v [22]. Ide o mikroskopický model predikujúci emisie v sekundových dátach na základe okamžitých podmienok jazdy.

Všeobecná rovnica modelu je:

$$TPE_i = EOE_i \cdot CPF_i$$

kde:

TPE_i sú celkové výfukové emisie pre polutant i [g/km],

EOE_i sú emisie na výstupe z motora pre polutant i [g/km],

CPF_i je podiel emisií zachytených na katalyzátore pre polutant i .

Emisie na výstupe z motora vychádzajú z chemickej rovnováhy:

$$EOE_i = FC \cdot \left(\frac{g_{emission}}{g_{fuel}} \right)_i$$

kde:

FC je spotreba paliva [g/km],

$\left(\frac{g_{emission}}{g_{fuel}} \right)_i$ je hmotnostný pomer emisií na výstupe z motora vzhľadom na spotrebované palivo.

Anov model [22] počíta priamo aj spotrebu paliva FC , ktorá je v HDM-4 nahradená vlastnými modelom vychádzajúc už z detailne modelovanej okamžitej spotreby paliva IFC :

$$FC = \frac{IFC \cdot \rho}{v} \cdot 1000$$

kde:

IFC je okamžitá spotreba paliva, popísaná vyššie [ml/s],

ρ je hustota paliva [g/ml],

v je rýchlosť vozidla [m/s].

Podiel emisií zachytených na katalyzátore predpisuje Anov model ako:

$$CPF_i = 1 - \varepsilon_i \cdot \exp \left((-b_i - c_i \cdot (1 - \phi^{-1})) \cdot FR \right)$$

čo pri predpoklade stechiometrickej zmesi paliva a vzduchu $\phi = 1$, rozpísaní FR ako rýchlosti spotreby paliva v g/s cez IFC a pridaní degradačného faktoru výfukového systému podľa švédskeho modelu [23] dostaneme rovnicu pre CPF v HDM-4:

$$CPF_i = (1 - \varepsilon_i \cdot \exp(-b_i \cdot IFC \cdot \rho)) \cdot \min \left(1 + \frac{r_i}{100} \cdot AGE, MDF_i \right)$$

kde:

ε_i je maximálny katalytický účinok pre polutant i ,

b_i je stechiometrický koeficient CPF pre polutant i ,

r_i je degradačný faktor polutantu i [%/rok],

AGE je vek vozidla v rokoch,

MDF_i je maximálny degradačný faktor pre polutant i .

Rovnice pre výpočet EOE pre CO, HC a NO_x uvádza priamo [22]:

$$EOE_{HC} = a_{HC} \cdot FC + \frac{r_{HC}}{v} \cdot 1000$$

$$EOE_{CO} = a_{CO} \cdot FC$$

$$EOE_{NOX} = \max\left(a_{NOX} \cdot \left(FC - \frac{FR_{NOX}}{v} \cdot 1000\right), 0\right)$$

Rovnica pre PM bola modelovaná analogicky ako EOE_{HC} :

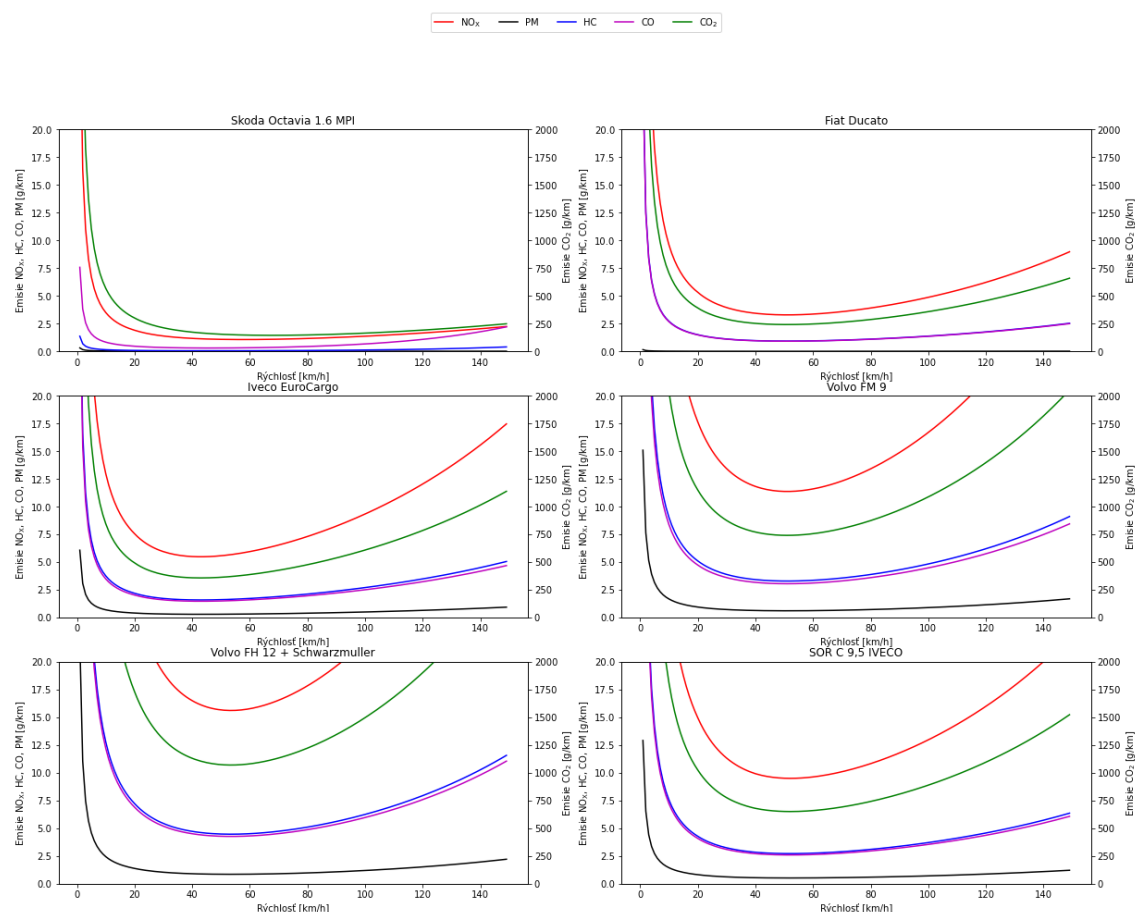
$$EOE_{PM} = a_{PM} \cdot FC + \frac{r_{PM}}{v} \cdot 1000$$

Objem emisií CO_2 sa počíta uvažovaním, že po odpočítaní všetkých ostatných uhlíkových emisií sa zvyšný uhlík vylúči ako CO_2 (uhlíková rovnováha), na základe čoho bola odvodená rovnica:

$$TPE_{CO_2} = 44,011 \cdot \left(\frac{FC}{12,011 + 1,008 \cdot a_{CO_2}} - \frac{TPE_{CO}}{28,011} - \frac{TPE_{HC}}{13,018} - \frac{TPE_{PM}}{12,011} \right)$$

2.7.4 Analýza emisného modelu HDM-4

Z popísaného modelu je zrejmé, že prostredníctvom okamžitej hodnoty paliva IFC majú vplyv na výšku jednotlivých predikovaných emisií aj technické parametre vozovky rovnaké ako pre spotrebu PHM.



Obrázok 38 Produkové emisie flotily HDM-4 SK na štandardnom úseku pri rôznych rýchlostiach

2.7.5 Ekonomická hodnota emisií

Ako je vidno, emisný model HDM-4 počíta emitované výfukové polutanty vo fyzických jednotkách (g/km). Aby bolo možné kombinovať vplyv emisií s ostatnými používateľskými nákladmi vyjadrenými v ekonomických cenách, je potrebné stanoviť ekonomické jednotkové ceny týchto externalít.

Ako vhodné riešenie sa zdá použiť jednotkové ceny uvedené v Príručke o externých nákladoch v doprave [24] (+ errata [25]) (hodnoty sú v €/kg):

Krajina	NH ₃	NMVOC	SO ₂	NO _x mesto	NO _x mimo mesto	PM2.5 metropol. ¹¹	PM2.5 mesto	PM2.5 mimo mesto	PM10 priemer
Slovensko	24,4	0,7	10,1	24,8	14,7	328	105	59	16,2
Česká republika	27,4	1,1	11,6	24,8	14,8	361	116	72	20,1
Maďarsko	18,9	0,8	9,9	26,8	15,8	317	102	59	19
Poľsko	14,4	0,7	8,2	14,7	8,9	282	91	52	16,1
Rakúsko	27,8	2,3	16,2	41,4	24,3	466	151	87	30,9

Emisie PM vznikajúce spaľovaním uhľovodíkových palív sú v kategórii PM2.5 [26], [27], [28], preto postačuje v reportingu uvažovať len s nimi. Jednotkové ceny PM10 sa používajú len pri modelovaní emisií z abrazívnych procesov na brzdách a pneumatikách, s čím HDM-4 neuvažuje.

Emisie skleníkových plynov (CO₂, CH₄, N₂O) sa prepočítavajú na ekvivalenty CO₂, tzv. CO₂e, preto Príručka stanovuje jednotkové náklady len pre CO₂, a to globálne pre všetky krajiny (skleníkové plyny pôsobia globálne). Hodnoty sú v €/t:

	Spodná úroveň	Stred	Vysoká úroveň
Krátke a stredné obdobie (do roku 2030)	60	100	189
Dlhé obdobie (od roku 2040 po 2060)	156	269	498

Jednotkové náklady pre CO₂ boli určené z prieskumu štúdií a literatúry, preto sú uvádzané v troch kategóriách ako priemery nižších hodnôt, stredných a vyšších hodnôt. Extrémy boli vylúčené.

Pre strategický reporting je možné vychádzať zo strednej hodnoty pre krátke a stredné obdobie (100 €/t). Hodnoty sú v cenách v roku 2016.

2.7.6 Záver

Z piatich vybraných emisií (CO₂, NO_x, PM, CO, HC) dokáže model HDM-4 kalkulovať všetky z nich.

Pre CO₂, NO_x a PM2.5 sú aj dobre stanovené jednotkové ceny €/kg.

HC by bolo vhodné v modeli rozbiť zvlášť na CH₄ a VOC, nakoľko CH₄ je zo svojej podstaty skleníkový plyn, na rozdiel od VOC, ktoré sú toxické, karcinogénne a tvoriace prízemný ozón. Ich pôsobenie a následky sú teda úplne iné, a preto by mali byť zvlášť aj stanovené škodové jednotkové ceny pre CH₄ a VOC.

Pre CO neboli nájdené zatiaľ žiadne vhodné jednotkové ceny.

Je možné teda uvažovať aspoň zatiaľ s emisným modelovaním CO₂, NO_x a PM2.5.

¹¹ metropolitné územie = mestá a aglomerácie s viac ako 0,5 mil. obyvateľmi.

2.8 Modely spoločenských indikátorov

2.8.1 Návrh možností

Ako bolo ukázané v texte vyššie, na hodnoty metrík spoločenských nákladov vplýva množstvo faktorov. De facto ide o kompletné a komplexné modelovanie prevádzky jednotlivých typov vozidiel na cestnej sieti a vyčísľovanie ich nákladov.

V rozsahu riešenia tejto RÚ sú len metriky a na ne nadväzujúce indikátory, ktoré charakterizujú stav vozoviek samotných.

Všetky navrhované KPI a ich metriky vyjadrujú navýšenie spoločenských nákladov kvôli technickému stavu vozoviek (marginálne spoločenské náklady). Ich výška tak odzrkadľuje čisto technický stav vozoviek a izoluje všetky ostatné vplyvy na spoločenské náklady pri prevádzke cestných vozidiel. Tieto metriky budeme označovať značkou dSC s prípadným dolným indexom, ktorý ich vzájomne odlišuje.¹²

Každý z navrhovaných indikátorov používa pre svoje vyčíslenie metriku navýšenia jednotkových spoločenských nákladov (marginálne jednotkové spoločenské náklady) vzhľadom na technický stav vozovky na úseku S , označenú ako $dUSC_S$.¹³

Metrika $dUSC_S$ sa počíta ako rozdiel medzi jednotkovými spoločenskými nákladmi (€/1000/voz/km) pri aktuálnom technickom stave vozovky na úseku S voči teoretickým jednotkovým spoločenským nákladom v základom stave. Vo všeobecnosti ide o taký technický stav, v ktorom sú jednotkové spoločenské náklady minimálne, teda vozovka je v čo najlepšom technickom stave vzhľadom na spoločenské náklady.

Uvažované kľúčové výkonnostné indikátory sú:

Navýšenie spoločenských nákladov kvôli technickému stavu vozoviek [€]	$dSC = 365000 \cdot \sum_{S \in S} dUSC_S \cdot RPD I_S \cdot l_S$ kde: $dUSC_S$ je navýšenie jednotkových spoločenských nákladov na úseku S v aktuálnom stave voči základnému technickému stavu vozovky $[\frac{1000}{\text{voz.km}}]$, $RPD I_S$ je RPD I na úseku S [voz/24 h], l_S je dĺžka úseku [km].
Priemerné navýšenie spoločenských nákladov kvôli technickému stavu vozoviek vážené dĺžkou [€, $\frac{1000}{\text{voz.km}}$]	$dSC_l = \frac{\sum_{S \in S} dUSC_S \cdot l_S}{\sum_{S \in S} l_S}$ kde: $dUSC_S$ je navýšenie jednotkových spoločenských nákladov na úseku S v aktuálnom stave voči základnému technickému stavu vozovky $[\frac{1000}{\text{voz.km}}]$, l_S je dĺžka úseku [km].

¹² dSC ako značka pre „delta social costs“.

¹³ $dUSC_S$ ako značka pre „delta unit social costs“ na úseku S .

Priemerné navýšenie spoločenských nákladov kvôli technickému stavu vozoviek vážené dopravným zaťažením $[\text{€} \cdot \frac{1000}{\text{voz.km}}]$	$dSC_t = \frac{\sum_{s \in S} dUSC_s \cdot RPD I_s \cdot l_s}{\sum_{s \in S} RPD I_s \cdot l_s}$ kde: $dUSC_s$ je navýšenie jednotkových spoločenských nákladov na úseku S v aktuálnom stave voči základnému technickému stavu vozovky $[\frac{1000}{\text{voz.km}}]$, $RPD I_s$ je RPD I na úseku S [voz/24 h], l_s je dĺžka úseku [km].
---	---

Prvý z nich predstavuje absolútnu hodnotu navýšených nákladov a táto je veľmi citlivá na dopravné zaťaženie. Výšku dopravnej intenzity však správca nie je schopný dostatočne ovplyvňovať, preto tento indikátor nie je úplne vhodný.

Druhý indikátor je priemerným navýšením na cestnej sieti. Využíva sa tu len implicitne skladba dopravného prúdu (ak to model výpočtu $dUSC_s$ vyžaduje), je preto najmenej citlivý na dopravné zaťaženie. To je súčasne nevýhoda tohto indikátora, keďže veľmi zaťaženým úsekom dáva rovnakú váhu ako málo zaťaženým úsekom.

Tretí indikátor predstavuje kompromis, v ktorom dopravne silne zaťažené úseky sú vážené viac, avšak výsledný priemer je normovaný celkovými dopravným zaťažením. Tento indikátor sa javí ako najvhodnejší.

Cieľové hodnoty nie je možné zatiaľ stanoviť. Je možné v súčasnosti aspoň stanoviť trend tohto KPI, ktorý by mal byť klesajúci.

2.8.2 Kalkulácia $dUSC_s$ s použitím modelu HDM-4

Na výpočet pomocnej metriky $dUSC_s$ (definícia v predchádzajúcej kapitole) sa použije výpočet spoločenských nákladov zložených z prevádzkových nákladov vozidiel, nákladov stratových časov a emisií z technického stavu vozovky v modeli HDM-4 tak, ako je popísané v kapitolách vyššie.

Vzhľadom na zvýšenie stability a miery ovplyvniteľnosti hodnoty KPI správcom, sa pri výpočte neuvažujú vzájomné vplyvy vozidiel. Vychádza sa teda čisto z voľných rýchlostí a neuvažujú sa akcelerácie plynúce zo vzájomného ovplyvňovania vozidiel.

Ako základný technický stav pre IRI môžeme použiť 1,0 mm/m. Táto hodnota je zvolená čiastočne arbitrérne so zohľadnením, že meracie zariadenie vykazuje nefiltrovaný šum a v praxi ani dokonale hladká vozovka nemá IRI rovné 0,0 mm/m.

Pre parameter MPD však nie je možné zatiaľ dobre stanoviť základnú hodnotu (hodnotu MPD, pri ktorej sú vzhľadom na premenné technické parametre vozovky minimalizované spoločenské náklady). V modeli HDM-4 sa uvažuje len jeho rola pri valivom odpore. Z tohto hľadiska sú želané čo najnižšie hodnoty. Avšak z hľadiska protišmykových vlastností sú vyššie hodnoty lepšie [1].

Na stanovenie základnej hodnoty je potrebné zakomponovať do modelu spoločenských nákladov aj vplyv MPD na dopravnú nehodovosť, čo je však mimo predmetu tejto RÚ.

Ak sa obmedzíme len na model HDM-4, potom základnú hodnotu môžeme položiť na 0,1 mm pri obdobnej arbitrérnej voľbe ako pre IRI.

Takto čisto technicky môžeme analyzovať citlivosť indikátora vzhľadom na IRI aj MPD.

Výpočet $dUSC_s$ na úseku znamená spočítať jednotkové spoločenské náklady na danom úseku pre každý typ vozidla flotily a tie následne vážiť podľa skladby dopravného prúdu. V grafoch závislostí $dUSC_s$ od IRI a MPD sú uvedené grafy pre každý z troch definovaných typov skladby dopravného prúdu v kap. 2.9.2.1.

2.8.3 Citlivosť metriky $dUSC_s$ na IRI

Uvádzame grafy závislosti $dUSC_s$ od IRI pre:

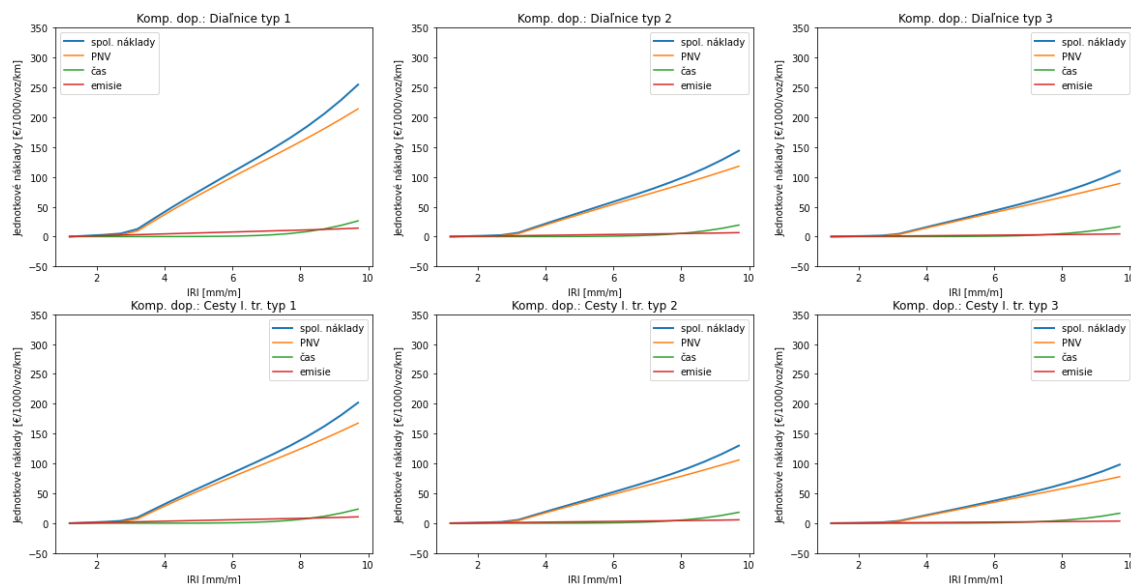
- každý zo štyroch typov základných úsekov daných predovšetkým smerovým a výškovým vedením, všetko extravilán,
- typ kompozície dopravného prúdu identifikovaný v kap. 2.9.2.,
- maximálne povolené rýchlosti 50 km/h, 90 km/h a 130 km/h.

V každom grafe je zobrazená veľkosť metriky $dUSC_s$ modrou farbou súčasne s veľkosťou jej jednotlivých zložiek (parciálnych metrík) pre marginálne prevádzkové náklady vozidiel, náklady zo stratových časov a škodových nákladov emisií.

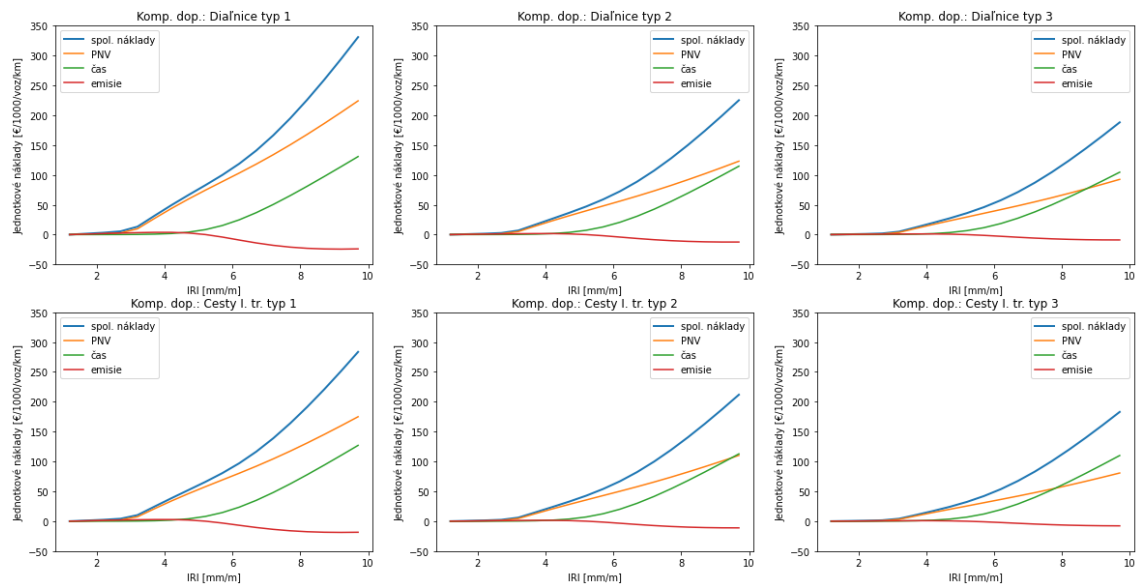
Základné úseky:

Typ	Stúpanie a klesanie [m/km]	Počet stúpaní a klesaní [# /km]	Horizontálna krivosť [°/km]	Klopenie [%]
rovný a rovinný	1	1	3	2,0
skoro rovinný so zákrutami	3	2	50	2,5
kopcovitý so zákrutami	15	2	75	3,0
kopcovitý s mnohými zákrutami	20	3	300	5,0

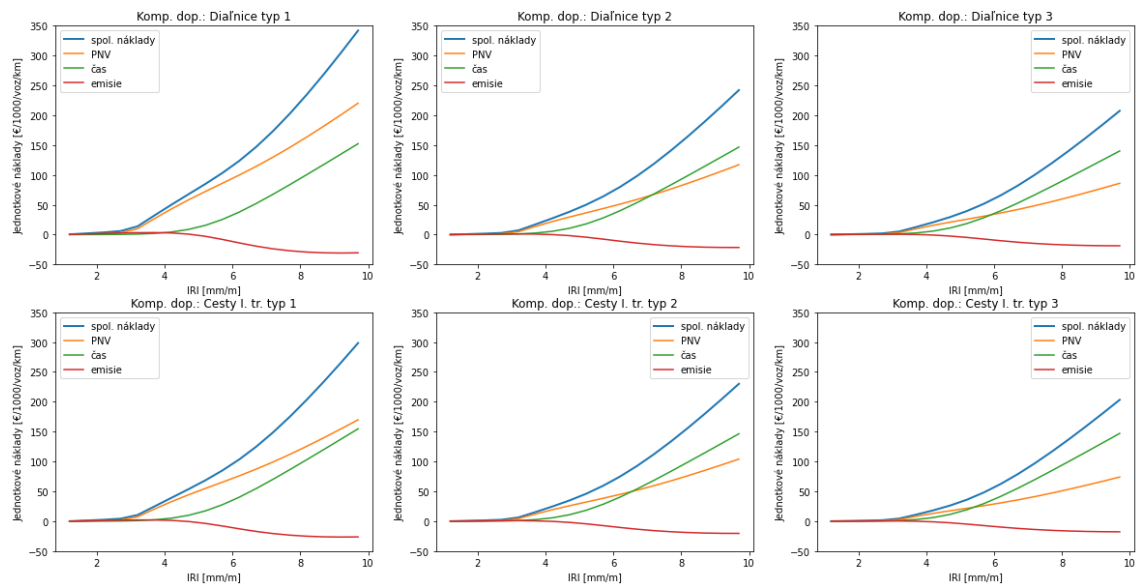
Rovinný a rovný, MPR 50 km/h



Rovinný a rovný, MPR 90 km/h

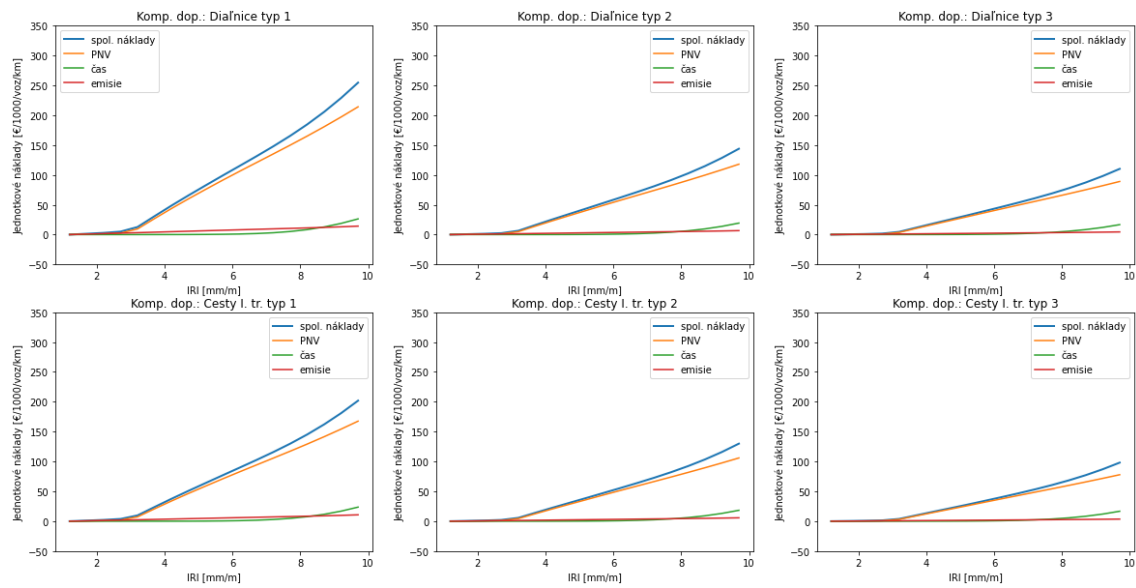


Rovinný a rovný, MPR 130 km/h

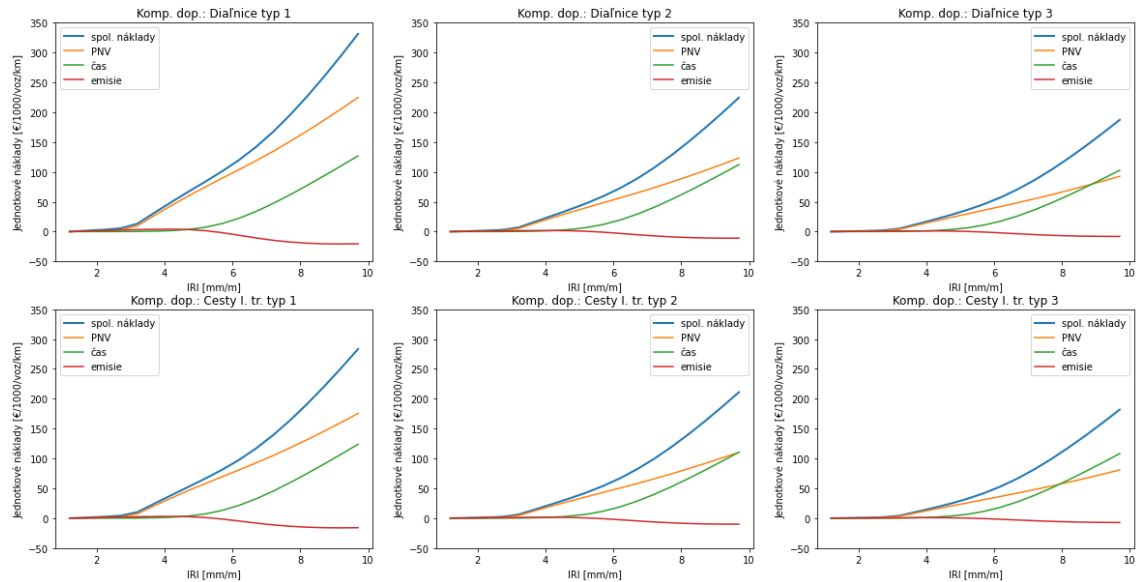


Obrázok 39 Závislosť d_{USC_5} od IRI, úsek rovný a rovinný

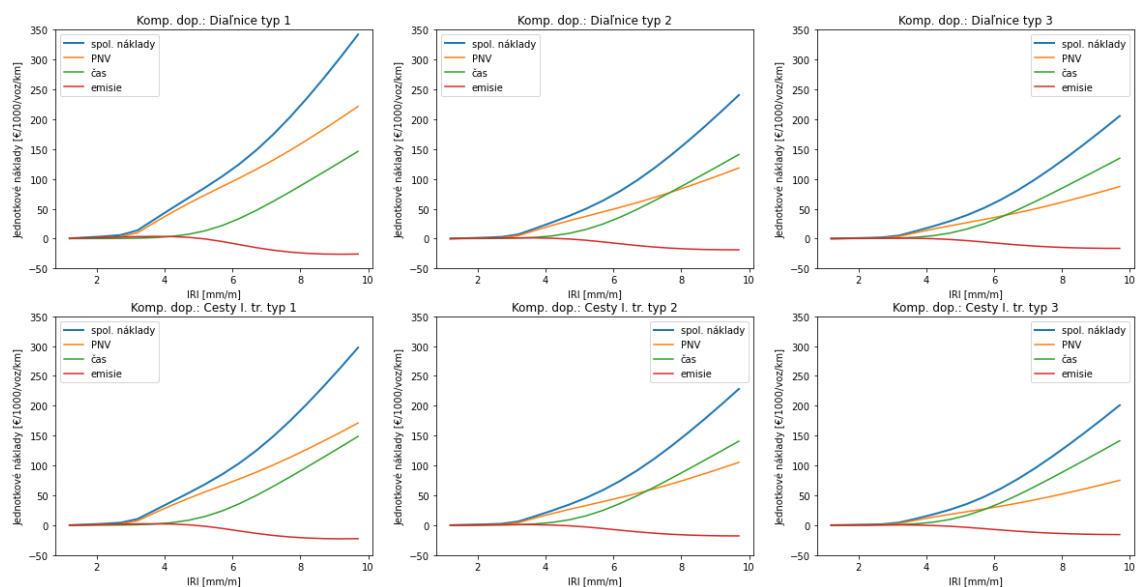
Skoro rovinný so zákrutami, MPR 50 km/h



Skoro rovinný so zákrutami, MPR 90 km/h

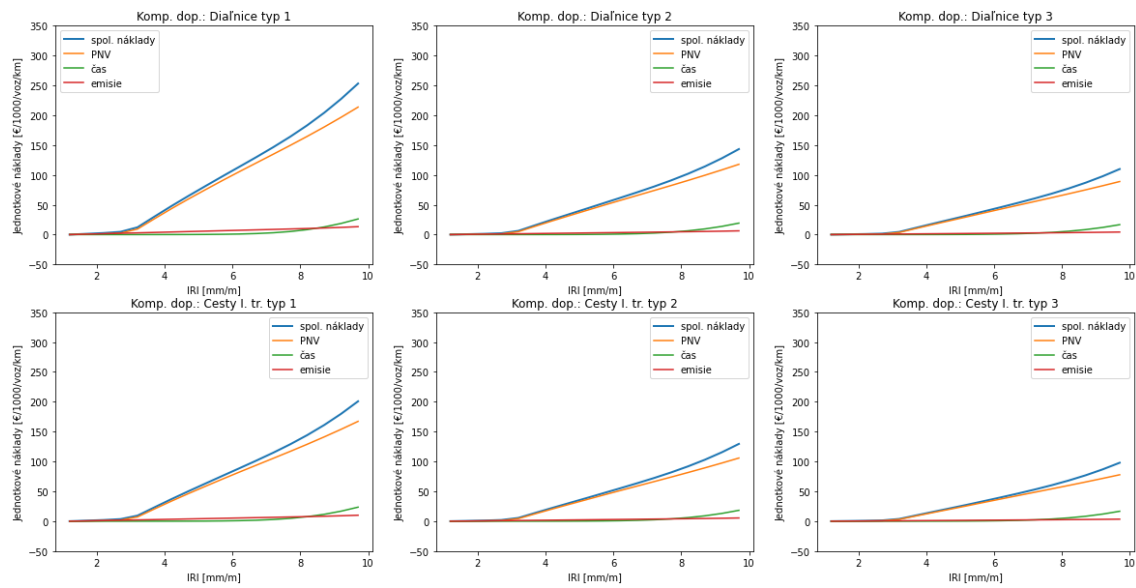


Skoro rovinný so zákrutami, MPR 130 km/h

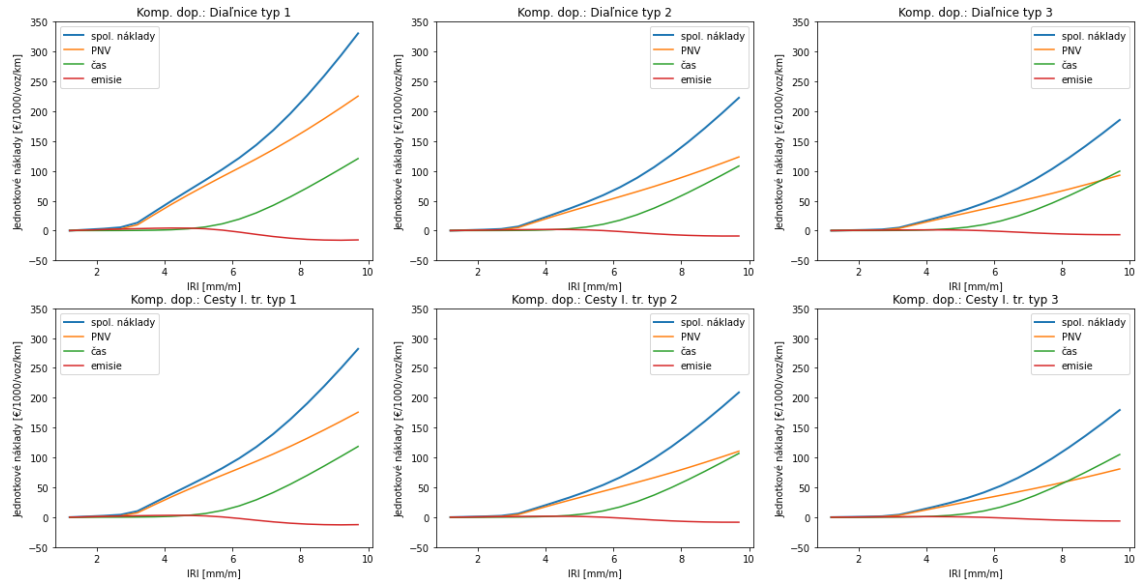


Obrázok 40 Závislosť $dUSC_s$ od IRI, úsek skoro rovinný so zákrutami

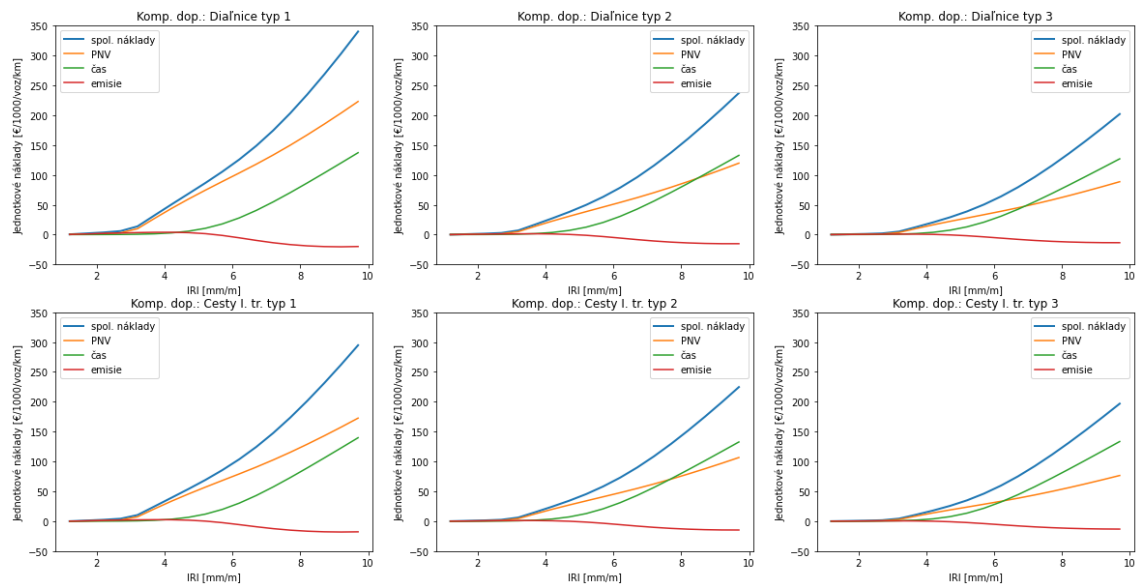
Kopcovitý so zákrutami, MPR 50 km/h



Kopcovitý so zákrutami, MPR 90 km/h

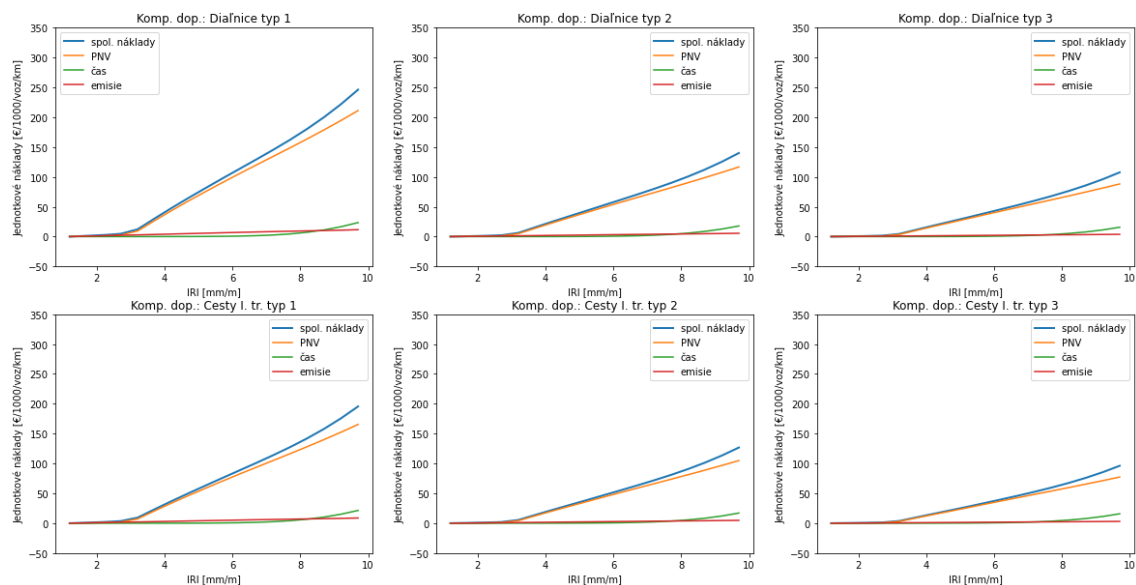


Kopcovitý so zákrutami, MPR 130 km/h

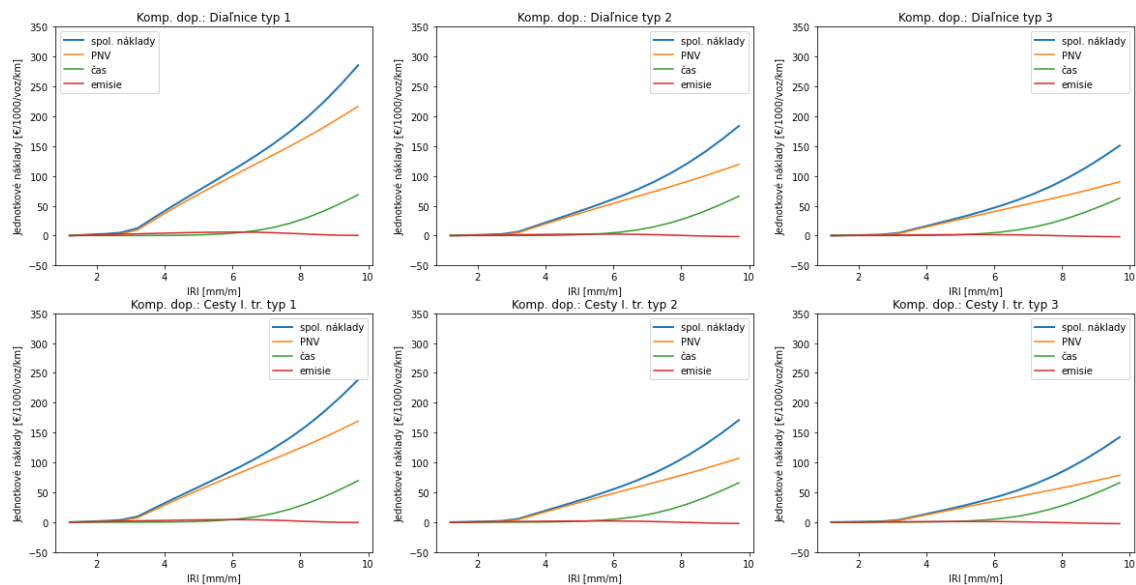


Obrázok 41 Závislosť $dUSC_s$ od IRI, úsek kopcovitý so zákrutami

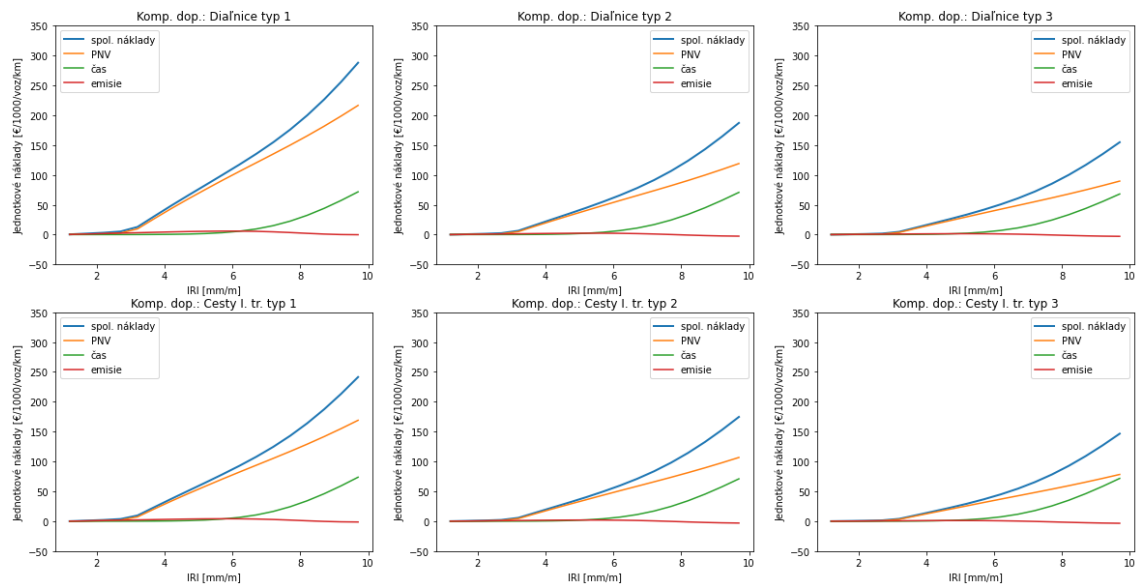
Kopcovitý s mnohými zákrutami, MPR 50 km/h



Kopcovitý s mnohými zákrutami, MPR 90 km/h



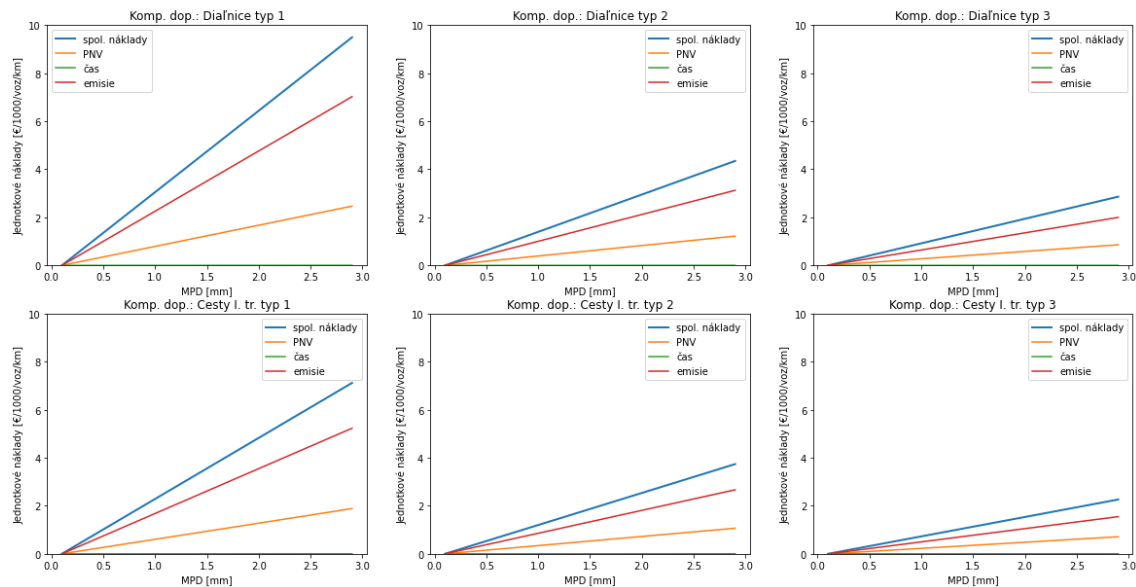
Kopcovitý s mnohými zákrutami, MPR 130 km/h


Obrázok 42 Závislosť $dUSC_S$ od IRI, úsek kopcovitý s mnohými zákrutami

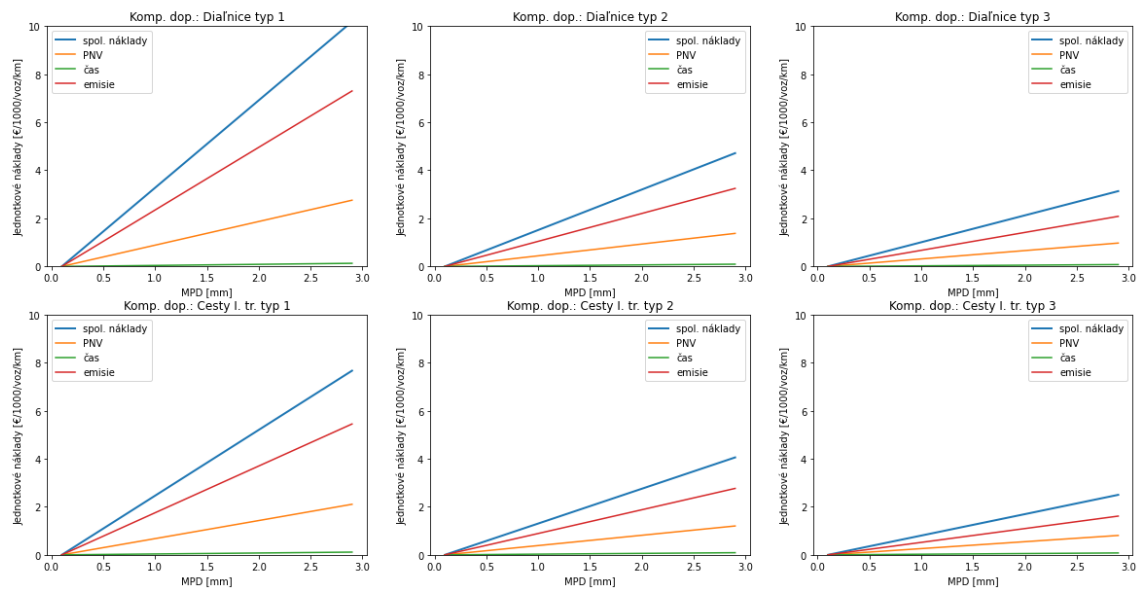
2.8.4 Citlivosť metriky $dUSC_S$ na MPD

Prezentované grafy sú v obdobnej postupnosti, ako v predchádzajúcej kapitole, avšak ilustrujú závislosť výšky nákladov od MPD.

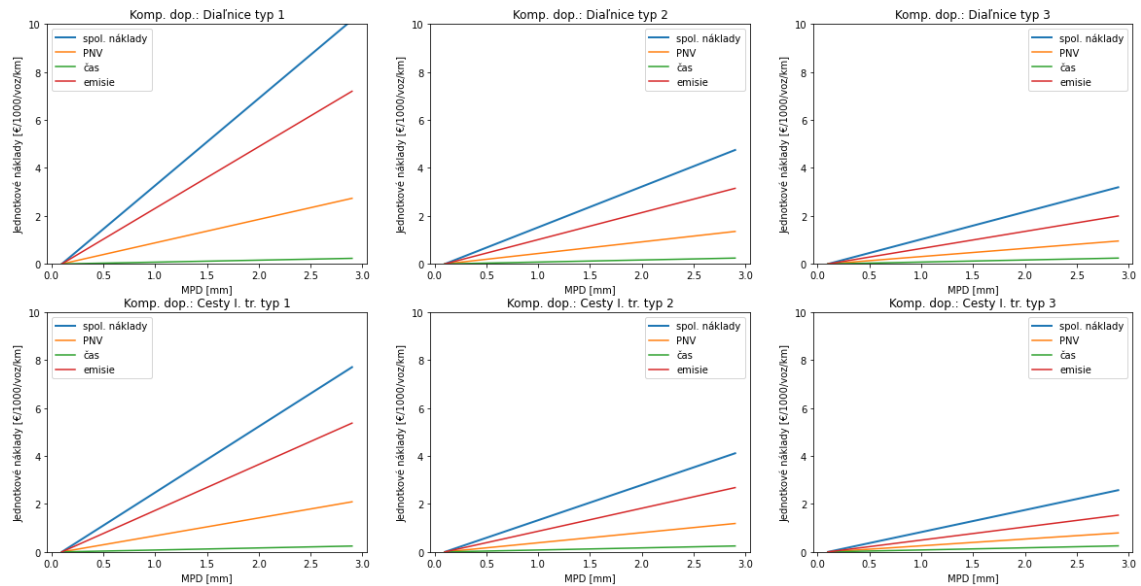
Rovinný a rovný, MPR 50 km/h



Rovinný a rovný, MPR 90 km/h

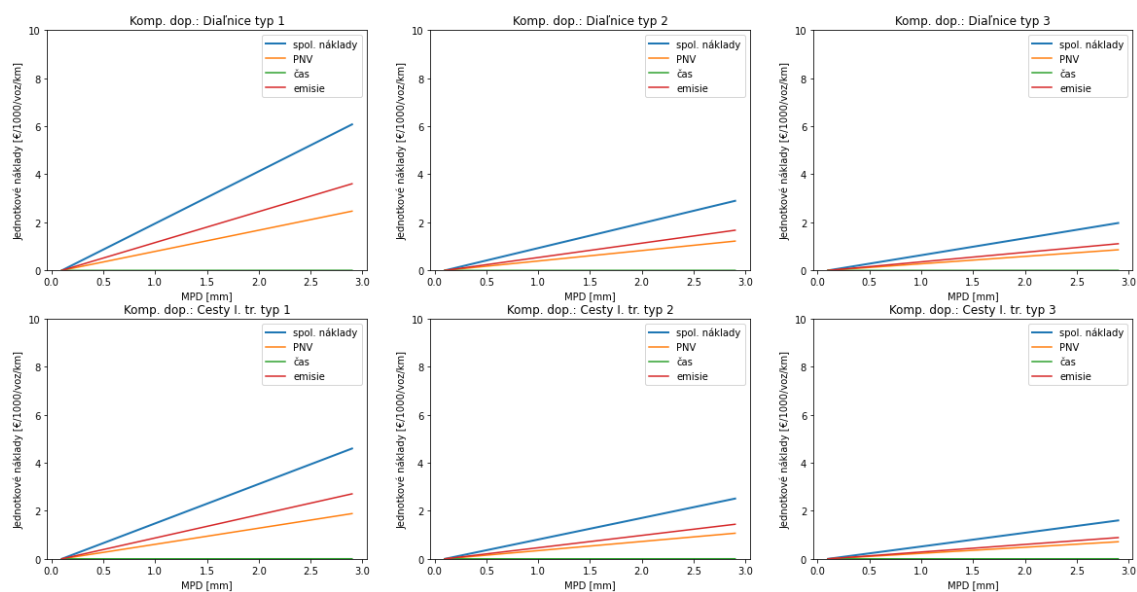


Rovinný a rovný, MPR 130 km/h

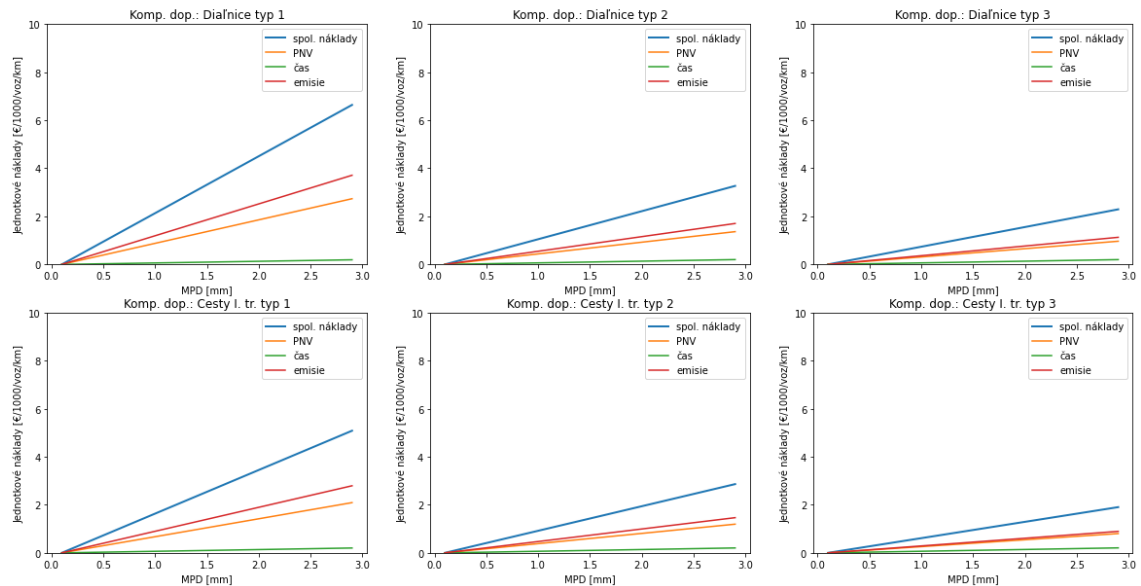
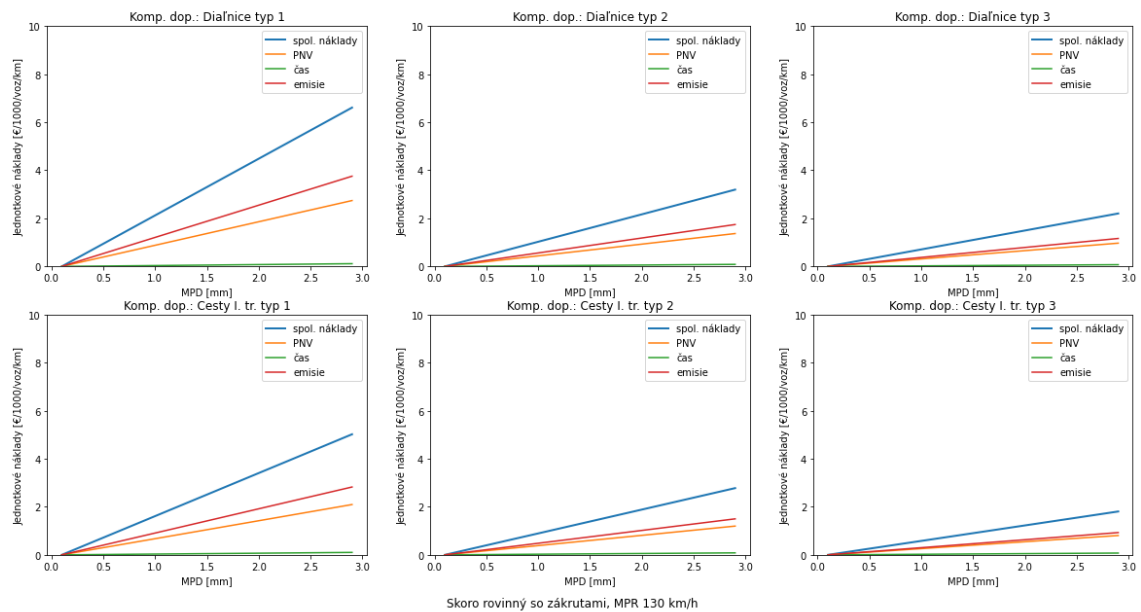


Obrázok 43 Závislosť d_{USC_5} od MPD, úsek rovný a rovinný

Skoro rovinný so zákrutami, MPR 50 km/h

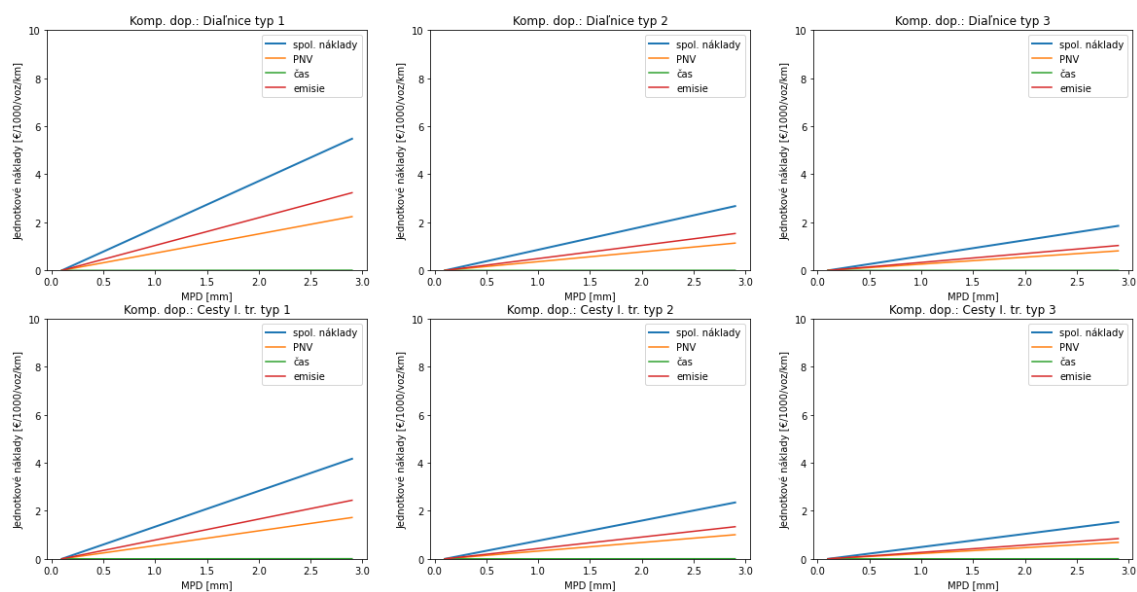


Skoro rovinný so zákrutami, MPR 90 km/h

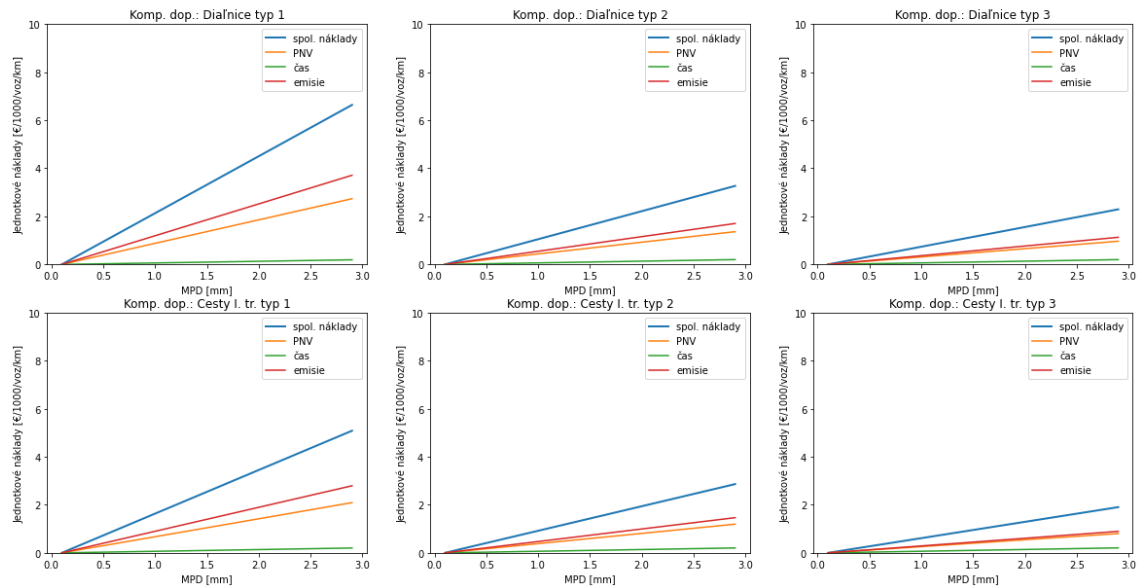
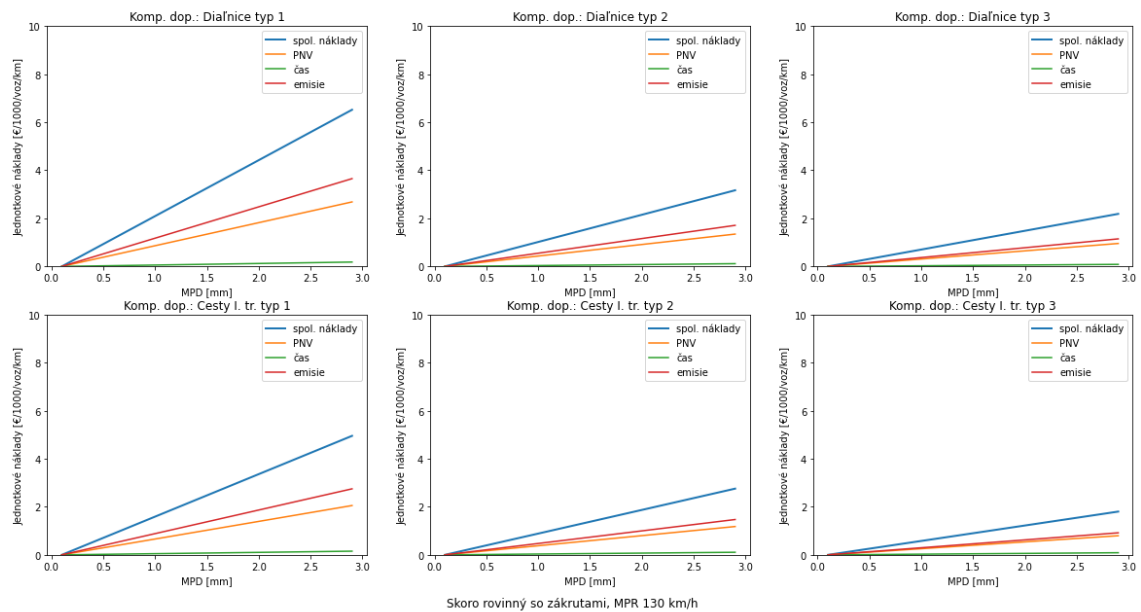


Obrázok 44 Závislosť $dUSC_s$ od MPD, úsek skoro rovinný so zákrutami

Kopcovitý so zákrutami, MPR 50 km/h

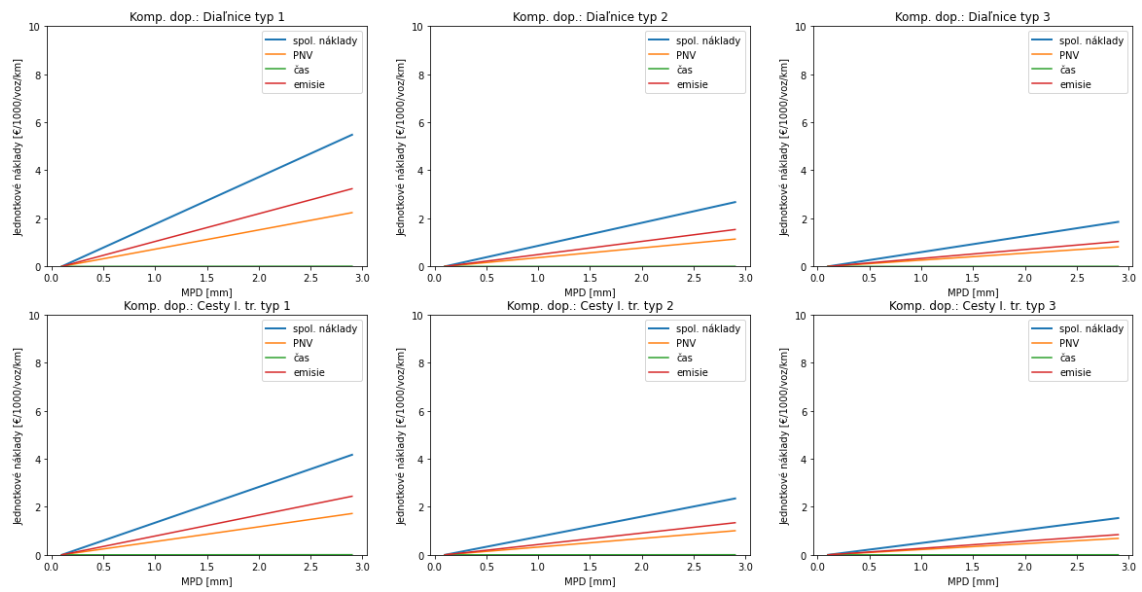


Kopcovitý so zákrutami, MPR 90 km/h

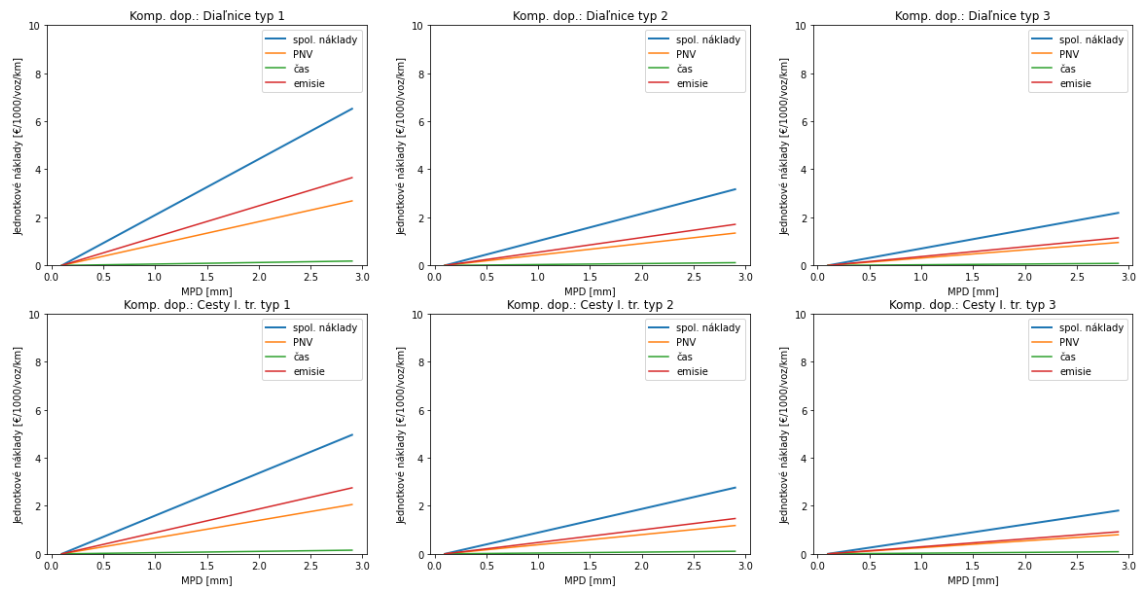


Obrázok 45 Závislosť $dUSC_s$ od MPD, úsek skoro rovinný so zákrutami

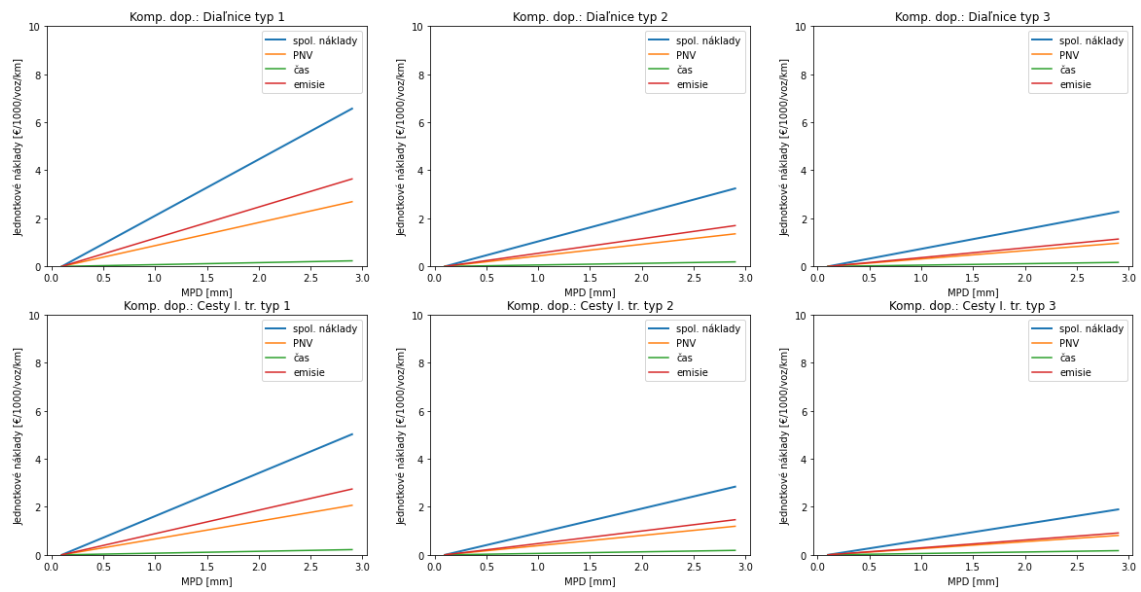
Kopcovitý so zákrutami, MPR 50 km/h



Kopcovitý so zákrutami, MPR 90 km/h

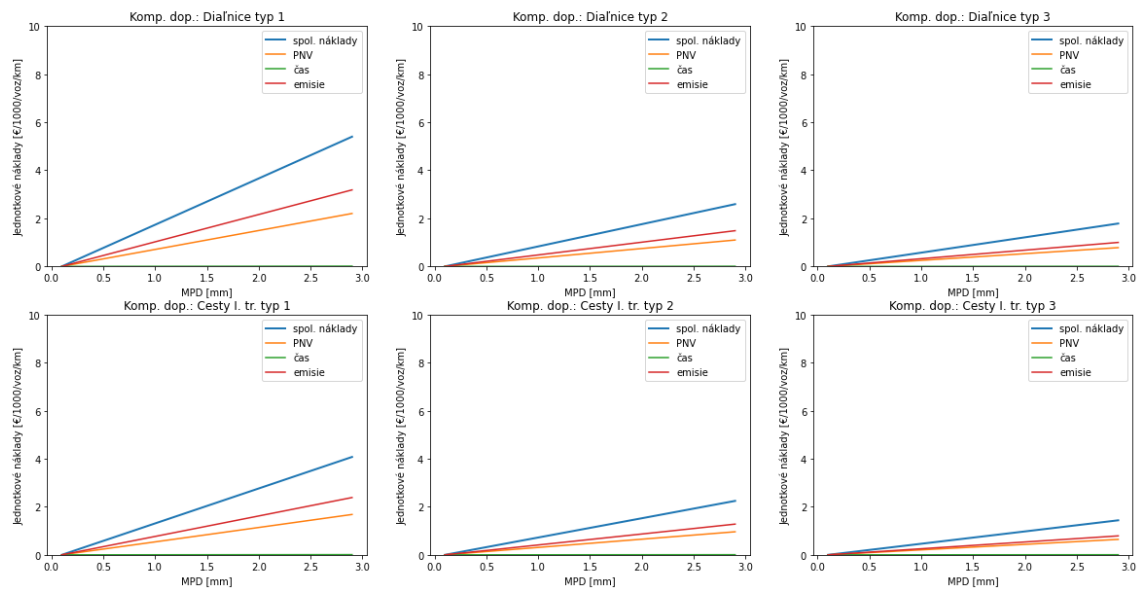


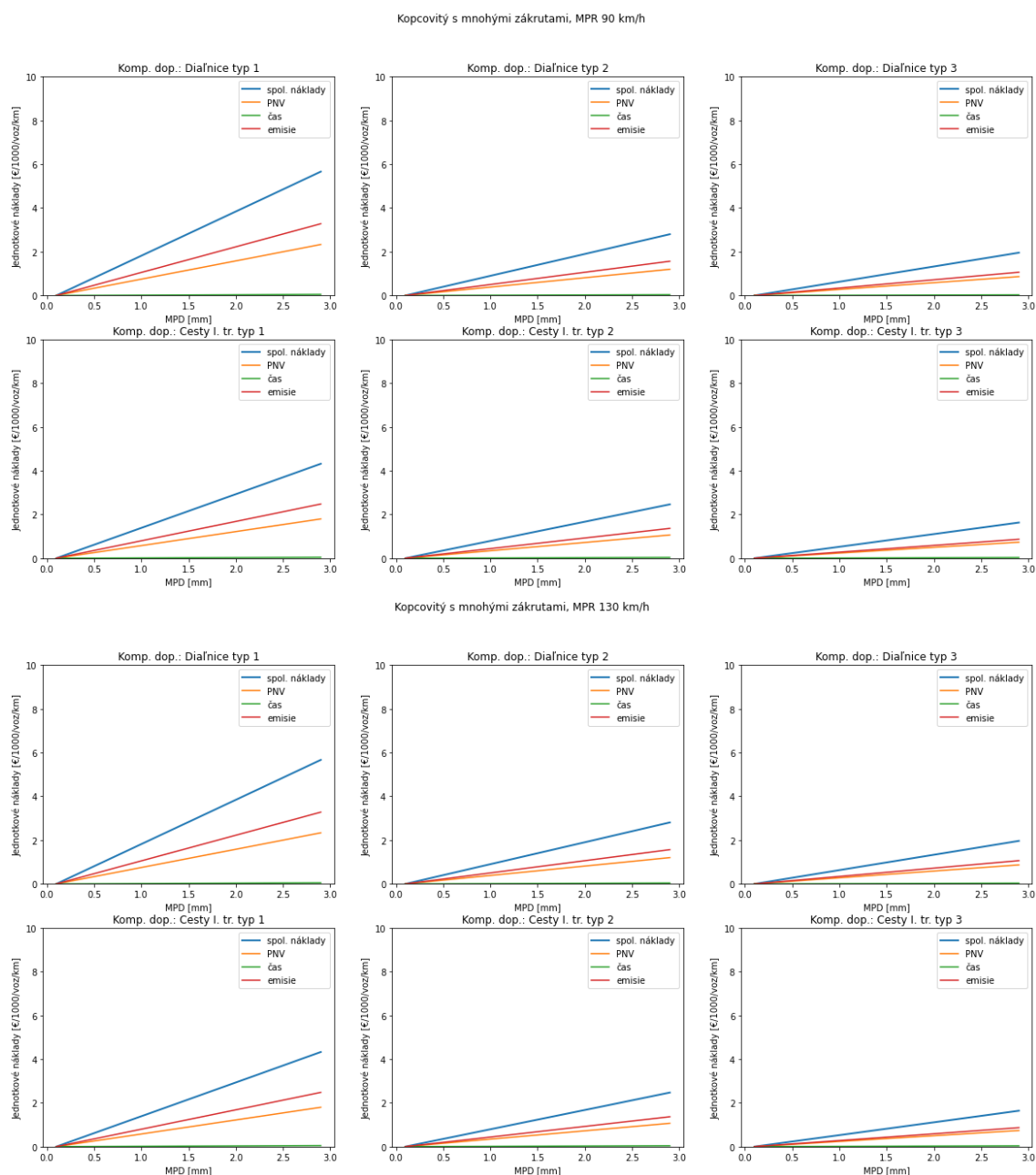
Kopcovitý so zákrutami, MPR 130 km/h



Obrázok 46 Závislosť $dUSC_s$ od MPD, úsek skoro kopcovitý so zákrutami

Kopcovitý s mnohými zákrutami, MPR 50 km/h





Obrázok 47 Závislosť $dUSC_s$ od MPD, úsek skoro kopcovitý s mnohými zákrutami

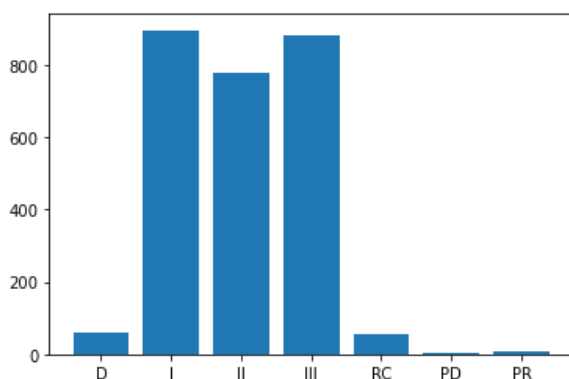
2.9 Analýza údajov o dopravnej intenzite na Slovensku

Ako vyplýva z vyššie uvedeného, na výpočet KPI spoločenských nákladov je potrebné disponovať údajmi o dopravných intenzitách aspoň v skladbe vozidlovej flotily HDM-4. V tejto kapitole je uvedená analýza dostupnosti týchto údajov.

2.9.1 Dáta celoštátneho sčítania dopravy

Slovenská správa ciest realizuje cca raz za 5 rokov celoštátne sčítanie dopravy (CSD), na ktorom sú sčítavané dopravné intenzity na všetkých úsekoch diaľnic, rýchlostných ciest, ciest I. a II. triedy. Cesty III. triedy nie sú sčítané kompletne – sčítanie prebieha len na vybraných úsekoch.

V dátovom sete SSC dopravných intenzít z CSD 2015 sa celkovo nachádza 2675 sčítacích úsekov:

Obrázok 48 Počty sčítacích úsekov v dátach CSD 2015 podľa tried CK¹⁴

Údaje o RPDI sú k dispozícii v členení:

Atribút	Význam
M	RPDI jednostopových motorových vozidiel (motocykle)
O	RPDI osobných motorových vozidiel, mikrobusev a motocyklov s postranným vozíkom
N1	RPDI ľahkých nákladných vozidiel (do 3,5 t)
N2	RPDI stredných nákladných vozidiel (3,5 t – 12 t)
PN2	RPDI stredných nákladných vozidiel (3,5 t – 12 t) s prívesmi
N3	RPDI ťažkých nákladných vozidiel (nad 12 t)
PN3	RPDI ťažkých nákladných vozidiel (nad 12 t) s prívesmi
NS	RPDI návesových súprav
A	RPDI autobusov
PA	RPDI kĺbových autobusov a autobusov s prívesmi.
TR	RPDI traktorov (s prívesmi aj bez)
C	RPDI bicyklov

2.9.2 Skladba dopravného prúdu

Na základe štatistickej analýzy výsledkov celoštátneho sčítania dopravy z roku 2015 boli v tejto RÚ diaľnice, rýchlostné cesty a cesty I. triedy rozdelené do troch typov podľa skladby denného dopravného prúdu vzhľadom na vozidlovú flotilu HDM-4 SK.

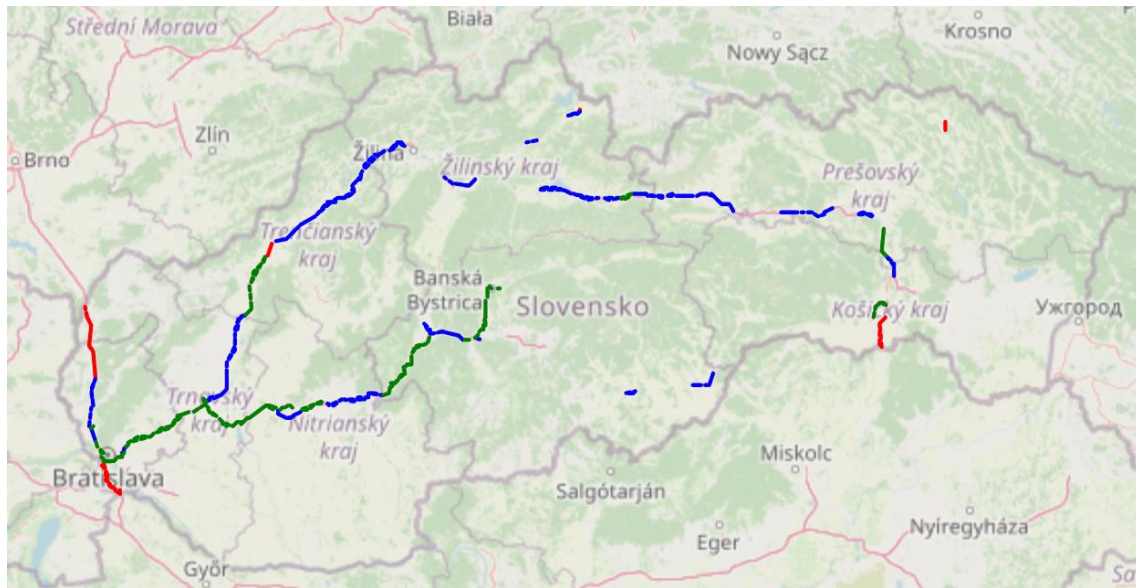
Charakteristika každého z troch typov a zatriedenie sčítacích úsekov sú uvedené v nasledujúcom texte. Typ číslo 1 je charakterizovaný vysokým podielom ťažkých nákladných vozidiel, kým na úsekoch typu 3 je nízky.

Na úsekoch, ktoré neboli sčítané, nie je možné namapovať sčítací úsek na súčasnú verziu referenčnej siete alebo nie je vhodné použiť výsledky celoštátneho sčítania dopravy, by sa mohol použiť imputačne typ číslo 2.

¹⁴ PD a PR sú „technické“ triedy CK – diaľničný privádzač a privádzač k rýchlostnej ceste.

2.9.2.1 Diaľnice a rýchlostné cesty

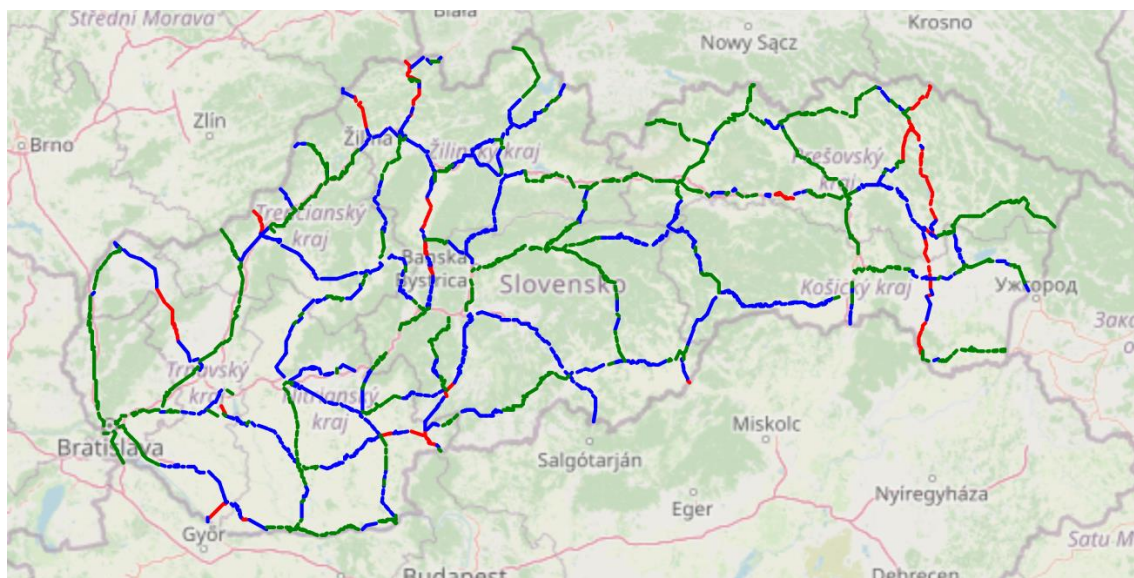
Typ	Farba v mape	Osobné	Ľahké nákladné	Stredné nákladné	Ťažké nákladné	Nákladné s prívesmi a náv. súp.	Autobusy
1	červená	50 %	12 %	4 %	2 %	31 %	1 %
2	modrá	75 %	9 %	3 %	1 %	11 %	1 %
3	zelená	84 %	7 %	2 %	0,5 %	6 %	0,5 %



Obrázok 49 Rozdelenie úsekov D/RC podľa typickej skladby dopravného prúdu

2.9.2.2 Cesty I. triedy

Typ	Farba v mape	Osobné	Ľahké nákladné	Stredné nákladné	Ťažké nákladné	Nákladné s prívesmi a náv. súp.	Autobusy
1	červená	65 %	7 %	3 %	2 %	22 %	1 %
2	modrá	79 %	7 %	3 %	2 %	8 %	1 %
3	zelená	87 %	6 %	2 %	1 %	3 %	1 %



Obrázok 50 13 Rozdelenie úsekov ciest I. triedy podľa typickej skladby dopravného prúdu

2.9.3 Analýza chýbajúcich dát dopravnej intenzity k roku 2020

Na preverenie dostupnosti údajov k aktuálnej verzii referenčnej siete bola pri riešení RÚ vykonaná analýza pokrytia údajov RPD1.

CSD prebieha len medzi križovatkami; nie sú preto dostupné žiadne údaje o intenzitách dopravy na lúčoch a vetvách referenčnej siete. V súčasnej verzii reportingu sa zatiaľ nepočíta s hodnotením úsekov na vetvách, preto nedostupné dáta na vetvách nepredstavujú problém.

Podľa očakávania najvyšší podiel lúčov vykazujú diaľnice a rýchlostné cesty – okolo 8 %. Cesty I. triedy zhruba polovicu. V nasledujúcej tabuľke je rozdelenie úsekov na lúče a medzikrižovatkové úseky:

Trieda	Dĺžka [km]	Podiel lúčov [%]	Podiel medzikriž. úsekov [%]
D	971,346	8,46	91,54
I	3451,653	3,68	96,32
II	3669,859	1,02	98,98
III	10351,528	0,42	99,58
RC	537,603	7,76	92,24

Je vidno, že lúče tvoria nie úplne zanedbateľnú časť hlavne diaľničnej siete. Na tejto časti cestnej siete nie sú evidované žiadne dopravné intenzity, ako je spomenuté vyššie.

Ak si zoberieme len medzikrižovatkové úseky, tak na diaľniciach, rýchlostných cestách, cestách I. a II. triedy, ktoré by mali byť sčítané v rámci CSD 2015 v celej dĺžke, dostaneme nasledovné dĺžkové podiely úsekov, na ktorých nie sú evidované k 09/2020 žiadne údaje o dopravných intenzitách:

Trieda	Dĺžka medzikr. úsekov [km]	Z toho dĺžka, na ktorých chýbajú dáta RPDI [km]	Dĺžkový podiel chýbajúcich dát [%]
D	889,216	201,268	22,63
I	3324,627	312,147	9,39
II	3632,539	258,335	7,11
III	10308,085	6286,862	60,99
RC	495,868	147,273	29,70
PD	1,226	1,226	100,00

Podiely chýbajúcich dát sú veľmi vysoké. Na diaľniciach ide takmer o ¼ celej siete, na rýchlostných cestách takmer 30 %, na cestách I. triedy takmer 10 % a na cestách II. triedy vyše 7 %.

Chýbajúce dáta sú dôsledkom dvoch faktorov:

1. novostavby od posledného sčítania dáta nemajú žiadne,
2. zmenami referenčnej siete sa stratila pôvodná väzba medzi sčítacími úsekmi a údajmi o RPDI, ktorá bola vytvorená medzi sčítacími úsekmi a verzou referenčnej siete, na ktorej boli sčítacie úseky pripravené (rok 2015 alebo 2016).

V rámci reportingu by mali byť hodnotené aj lúče. Analogická tabuľka dĺžok s chýbajúcimi dátami RPDI, pokiaľ zahrnieme okrem medzikrižovateľných úsekov aj lúče, je nasledovná:

Trieda	Dĺžka medzikr. úsekov a lúčov [km]	Z toho dĺžka, na ktorých chýbajú dáta RPDI [km]	Dĺžkový podiel chýbajúcich dát [%]
D	971,346	270,047	27,80
I	3451,653	396,772	11,50
II	3669,859	282,848	7,71
III	10351,528	6321,929	61,07
RC	537,603	176,876	32,90
PD	1,226	1,226	100,00

Na diaľniciach chýba RPDI na takmer 30 % dĺžky, na rýchlostných cestách na 1/3 siete a na cestách I. triedy skoro 12 %.

Tieto podiely sú tak vysoké, že je nemožné využiť údaje o dopravnej intenzite v rámci reportingu. V reportingu je možné tolerovať maximálne 5 % dĺžok s chýbajúcimi dátami.

2.9.4 Analýza aktuálnosti údajov dopravnej intenzity

Okrem problému chýbajúcich údajov s RPDI spomenutom v predchádzajúcej kapitole, je otáznaj aj použiteľnosť údajov, ktoré sú k dispozícii.

Frekvencia sčítania dopravy raz za 5 rokov bez priebežnej aktualizácie je na rozvíjajúcej sa (nedobudovanej) cestnej sieti, akou je aj cestná sieť na Slovensku, príliš nízka.

Údaje RPDI na úsekoch ciest, popri ktorých boli vybudované obchvaty alebo nové typicky diaľničné úseky, nie sú použiteľné vôbec. Novostavby, samotné, prirodzene, nemajú údaje o RPDI žiadne.

Je potrebné tiež vnímať rozdiely v intenzitách medzi jednotlivými sčítaniami. Tabuľka nižšie uvádza štyri námatkovo vybrané úseky, ktoré ukazujú veľký pokles dopravnej intenzity v kategórii „O“¹⁵ z roku 2010 na rok 2015, ktorý je ale veľmi málo pravdepodobný (ide všetko o úseky v blízkosti Bratislavy):

Č. sčít. úseku	Popis úseku	2010	2015	Nárast
87020	D1 Bratislava - Senec	59606	52260	-7346
80130	I/61 Ivanka p. Dunaji - Bernolákovo	17291	12011	-5280
81460	I/63 Bratislava - Dunajská Lužná	18100	17912	-188
82650	II/572 Bratislava - Most pri Bratislave	14643	13630	-1013

Rozdiely môžu byť spôsobené v zmene metodiky medzi jednotlivými sčítaniami, aj chybami pri sčítaní samotnom.

Otázne sú aj výhľadové koeficienty uvedené v TP 070 Prognózovanie výhľadových intenzít na cestnej sieti do roku 2040 [29], ktoré neboli aktualizované de iure už 7 rokov, avšak de facto minimálne cca 15 rokov, keďže tie v TP 070 sú v skutočnosti koeficienty z predchádzajúcej verzie tabuľky výhľadových koeficientov z roku 2006 (MP 1/2006) prepočítané jednoduchým matematickým vzorcom na východiskový rok 2010.

2.10 Podobné zahraničné modely

Podobné modely KPI spoločenských nákladov sa podarilo dohľadať len na Novom Zélande.

V štúdií [30] je uvedený návrh novej novozélandskej ekonomickej metriky – tzv. index prevádzkových nákladov vozidiel (*vehicle operating cost index*). Jedným z cieľom tejto štúdie bola práve analýza a návrh nových ukazovateľov, ktoré by lepšie indikovali vplyv zmeny stavu vozoviek v cestnej sieti na náklady koncových používateľov.

Novo navrhnutý index sa počíta takto:

$$VOCi_{total} = \sum VOC_{RI} \cdot VKT_{RI}$$

kde:

VOC_{RI} sú dodatočné prevádzkové náklady vozidiel kvôli nárastu nerovností na hodnotu RI ,

VKT_{RI} je dopravné zaťaženie (počet voz.km) na úsekoch s hodnotou nerovnosti RI .

Ide teda o súčet dodatočných prevádzkových nákladov vozidiel vážený dopravným zaťažením.

Metrika sa počíta z IRI priemerovaných na 100 metrové úseky.

Viac zaťažené cestné siete budú mať celkovú hodnotu $VOCi_{total}$ prirodzene vyššiu ako menej zaťažené siete s porovnateľnou kvalitou, preto je výhodné spočítať normalizovanú metriku, čo je de facto priemer VOC vážený dopravným zaťažením:

$$VOCi_{perVKT} = \frac{VOCi_{total}}{VKT_{total}}$$

kde VKT_{total} je celkový počet voz.km na cestnej sieti.

¹⁵ V kategórii „T“ (ťažké nákladné vozidlá) prišlo medzi CSD 2010 a CSD 2015 k zmene metodiky (zrušenie počítania prívesov ako samostatných vozidiel), preto nie sú RPDI v tejto kategórii priamočiaro porovnateľné.

Táto normalizácia umožňuje aj vyčíslenie medziročného trendu bez ohľadu na zvyšovanie celkového dopravného zaťaženia.

Na Novom Zélande je vypracovaná detailná príručka ekonomického hodnotenia investičných projektov na cestnej sieti, v ktorej sú uvedené tabuľky a regresné rovnice pre výpočet marginálnych prevádzkových nákladov vozidiel po navýšení pozdĺžnej nerovnosti a v najnovšej verzii (z roku 2020) aj pri zvýšení MPD a priehybu pod pákovým priehybomerom [31].

Regresná rovnica pre navýšenie VOC z navýšenia IRI:

$$VOC_{RI} = \min(a + b \cdot \ln(RI) + c \cdot \ln^2(RI) + d \cdot \ln^3(RI) + e \cdot \ln^4(RI) + f \cdot \ln^5(RI), g \cdot RI + h)$$

kde $RI = \max(2,5; IRI)$ pri dodatočnej podmienke, že pri IRI menšej ako 3,8 mm/m by sa nemala použiť vôbec, nakoľko dodatočné náklady sú minimálne.

Marginálne náklady pre MPD sú 0,20 centov/voz/km pre navýšenie MPD o 1 mm.

Marginálne náklady z elastického priehybu netuhých vozoviek (pod ťažkými nákladnými vozidlami) z dôvodu zvýšenia valivého odporu sú:

Trieda vozidiel	Marginálne náklady v centoch/voz/km na 1 mm priehybu pák. priehybomera
stredné nákladné vozidlá (dvojnápravové nad 3,5 t) – MVC	2,5
ťažké nákladné vozidlá I (nekĺbové s príviesom alebo bez alebo kĺbové do 4 náprav) – HCVI	3,9
ťažké nákladné vozidlá II (návesové súpravy a kĺbové nákladné vozidlá s 5 a viac nápravami) – HCVII	5,3
autobusy	3,9

2.11 Záver

Pre modelovanie metrík spoločenských nákladov kvôli zavedeniu KPI súvisiaceho so spoločenskými nákladmi prevádzky vozidiel na cestnej sieti sa javí ako najvhodnejšie použiť model HDM-4. Ide o zavedený, medzinárodne uznávaný model, vyvíjaný počas mnohých rokov. Model HDM-4 umožňuje ako jeden z mála vyčíslňovať komplexné spektrum nákladov, vrátane prevádzkových nákladov vozidiel, nákladov zo stratových časov a škodových nákladov emisií.

Z premenných technických parametrov uvažuje s IRI v pomerne zložitej interakcii a MPD pri výpočte odporu proti valeniu. Na prvý z nich je pomerne citlivý vzhľadom na marginálne spoločenské náklady, na druhý z nich výrazne menej.

HDM-4 však neberie do úvahy hĺbku vyjazdených koľají, ktorý ako dostupný parameter na úrovni cestnej siete je k dispozícii na Slovensku a bolo by vhodné ho zaviesť. Z praxe vieme, že nad istú hĺbku sú schopné vyjazdené koľaje ovplyvňovať rýchlosti vozidiel. Tento faktor by mohol byť zakomponovaný po ďalšom výskume do modelu voľných rýchlostí HDM-4. Iný vplyv vyjazdených koľají súvisí s protišmykovými vlastnosťami vozoviek a mal by byť súčasťou parciálneho modelu dopravných nehôd. Tento model už môže zakomponovať aj šmykové trenie prostredníctvom vlastností mikrotextúry.

Interakcia MPD v HDM-4 vzhľadom na spoločenské náklady je takmer čisto kladne lineárna, t.j. náklady rastú so zvyšujúcim sa MPD od 0 mm (konštantne s nárastom jednotky MPD). Je to spôsobené tým, že MPD vstupuje v HDM-4 len do výpočtu valivého

odporu. HDM-4 sa nezaobrá protišmykovými vlastnosťami vozoviek, pri ktorých naopak je zvyšujúca sa makrotextúra pozitívny jav. Toto je problém, nakoľko spolu s indikátorom KPI03 (% podiel vozoviek s nevyhovujúcou priemernou hĺbkou makrotextúry kvôli znížením protišmykovým vlastnostiam) dostaneme vnútorne nekonzistentný model indikátorov. Zavedením samostatného modelu dopravnej nehodovosti do zloženého KPI spoločenských indikátorov by bolo možné tento problém eliminovať, čo si však vyžaduje ďalší výskum.

V rámci záverov analýzy možných KPI bol zvolený priemer jednotkových spoločenských nákladov na celej sieti vážený dopravným zaťažením.

Na výpočet tohto indikátora sú potrebné dopravno-inžinierske údaje o skladbe dopravného prúdu a RPDÍ na úrovni cestnej siete. Ako ukázala analýza popísaná vyššie, tieto údaje nie sú dostupné v dostatočnej kvalite a kvantite.

Na základe uvedeného ešte nie je ešte vhodné zaviesť komplexný KPI spoločenských nákladov na Slovensku. Na zavedenie takéhoto KPI odporúčame:

- navrhnuť konzistentný prístup k MPD (valivý odpor vs. protišmykové vlastnosti vozoviek),
- zabezpečiť údaje o RPDÍ a skladbe dopravného prúdu v dostatočnej kvalite a kvantite na úrovni cestnej siete,
- zakomponovať hĺbku vyjazdených koľají do modelu (napr. znižovaním rýchlostí v modeli HDM-4 a vplyvom na bezpečnosť cestnej premávky za mokra pri kalkulácii následkov dopravných nehôd).

3 Analýza a technický návrh systému merania výkonu

Vzhľadom na rozbor KPI spoločenských nákladov, v ktorom sa konštatuje, že podobné KPI pre strategický reporting vozoviek v súčasnosti ešte nie je možné zaviesť (kap. 2.11), je ďalej popísaný funkčný návrh, návrh technickej architektúry a popisy algoritmov pre KPI01-KPI04, ktoré je reálne vyhodnocovať každoročne na úrovni cestnej siete.

Tieto KPI sú nasledovné [1]:

Indikátor	Metrika	Navrhovaná cieľová hodnota	Relevantné ciele
KPI01: % podiel vozoviek v zlom stave z hľadiska pozdĺžnych nerovností	% dĺžkovo vážený podiel vozoviek s klasifikačným stupňom IRI 4 alebo 5	< 5 % (diaľnice/RC) < 10 % (cesty I. triedy)	komfort jazdy používateľov ciest, prevádzkové náklady vozidiel, emisie, bezpečnosť cestnej premávky
KPI02: % podiel vozoviek v zlom stave z hľadiska priečných nerovností (len vozovky s asfaltovým krytom)	% dĺžkovo vážený podiel vozoviek s klasifikačným stupňom hĺbky vyjazdených koľají 4 alebo 5	< 5 % (diaľnice/RC) < 10 % (cesty I. triedy)	bezpečnosť cestnej premávky, komfort jazdy
KPI03: % podiel vozoviek s nevyhovujúcou makrotextúrou vzhľadom na protišmykové vlastnosti	% dĺžkovo vážený podiel vozoviek s nevyhovujúcou hodnotou MPD podľa STN 73 6195	< 5 %	bezpečnosť cestnej premávky
KPI04: % podiel vozoviek s nevyhovujúcimi protišmykovými vlastnosťami podľa koeficientu pozdĺžneho trenia	% dĺžkovo vážený podiel vozoviek s nevyhovujúcou hodnotou Mu80 podľa STN 73 6195	< 5 %	bezpečnosť cestnej premávky

KPI05 pre hodnotenie prevádzkovej výkonnosti vozoviek je možné vyhodnocovať až po zabezpečení dostatočného množstva vstupných údajov. Podrobnejší rozbor je uvedený ďalej v tejto kapitole.

Indikátor	Metrika	Navrhovaná cieľová hodnota	Relevantné ciele
KPI05: % podiel vozoviek so zlou únosnosťou (len asfaltové vozovky)	% dĺžkovo vážený podiel vozoviek s klasifikačným stupňom únosnosti podľa indexov krivosti 4 alebo 5	< 10 %	hodnota majetku, efektívne hospodárenie správcu

Tieto KPI vychádzajú z rozboru vykonaného v I. časti RÚ. Do zoznamu bolo pridané nové KPI pre hodnotenie protišmykových vlastností pozdĺžneho šmykového trenia (pozri

aj kap. 3.4.2.2). Cieľové hodnoty boli navrhnuté na základe cieľových hodnôt obdobných KPI v zahraničí a so zohľadnením analýz vykonaných v I. časti RÚ [1].

3.1 Procesný návrh

V tejto kapitole je popísaný procesný návrh vyhodnotenia KPI v rámci SMV v notácii BPMN [32].

Vyhodnotenie KPI sa realizuje každoročne. Proces začína v marci nasledujúceho roka k roku vyhodnotenia importom údajov z SSC CDB za uzavretý predchádzajúci rok.

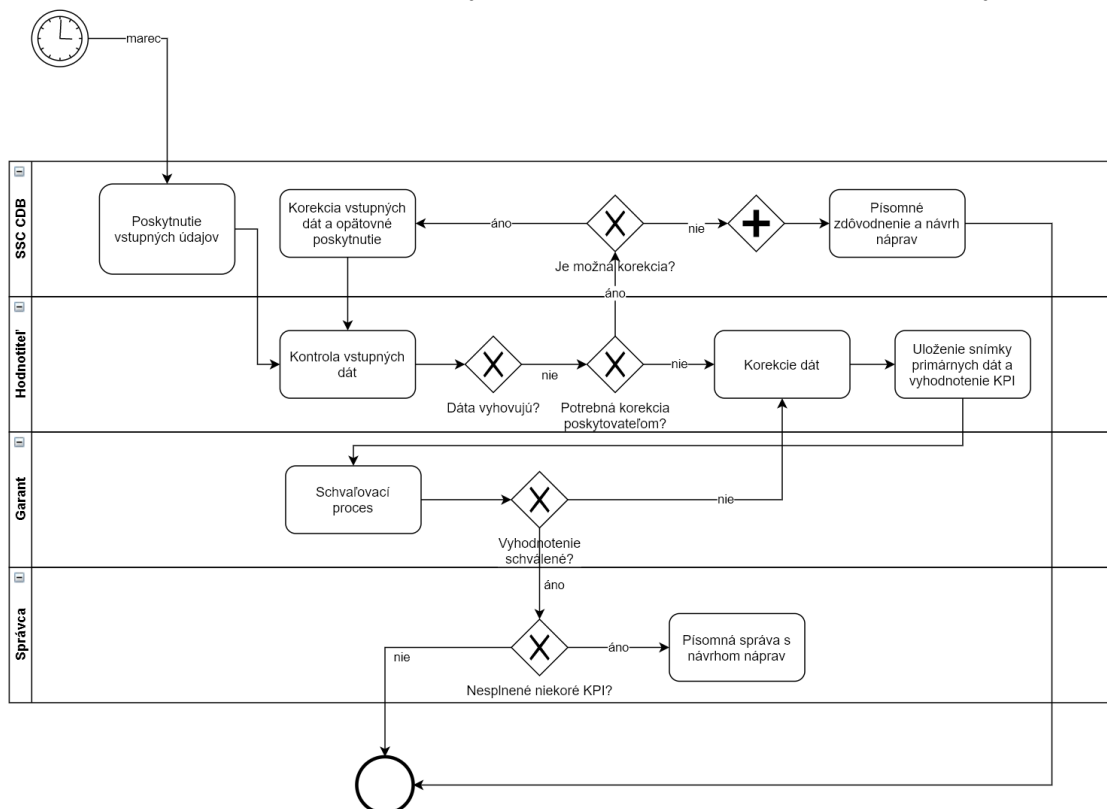
Hodnotiteľ po importe vstupných údajov spúšťa kontroly ich kvality. Pokiaľ vstupné dáta nie sú vyhovujúce, je možné zopakovať viackrát cyklus korekcie údajov na strane poskytovateľa (SSC CDB) a opakovaného importu s vyhodnotením kvality dát. Alternatívne je možné údaje korigovať na strane SMV, ale len v raritných prípadoch a kedy nie je možné dáta opraviť na strane poskytovateľa. V prípade, že dáta nie je možné skorigovať a následkom toho nebude možné vyhodnotiť niektoré z KPI, musí poskytovateľ údajov spracovať písomnú správu, v ktorej zhrnie dôvody a navrhne nápravné opatrenia, ktoré zamedzia opakovaniu takejto udalosti.

Kontroly a importy je potrebné zrealizovať najviac v priebehu dvoch mesiacov, t.j. do konca apríla.

Následne sa pristupuje k vyhodnoteniu samotných KPI. Po vyhodnotení prebehne finálna kontrola garantom SMV. Pokiaľ sa nájdu ešte nejaké nezrovnalosti, dáta sa korigujú na strane SMV a opätovne sa spúšťa vyhodnotenie KPI. Tento cyklus je potrebné zrealizovať najviac v priebehu dvoch mesiacov, t.j. najneskôr do konca júna.

Najneskôr v priebehu júla musia byť zverejnené schválené KPI za sieť diaľnic, rýchlostných ciest a ciest I. triedy.

KPI sa distribuujú správcovi primárne v elektronickej forme v rámci SMV. Pokiaľ správca nesplní niektoré KPI, je jeho povinnosťou vypracovať písomnú správu, v ktorej uvedie návrh na nápravné opatrenia s časovým plánom na splnenie cieľov nesplnených KPI.



Obrázok 51 BPMN model vyhodnotenia KPI

3.2 Funkčný návrh

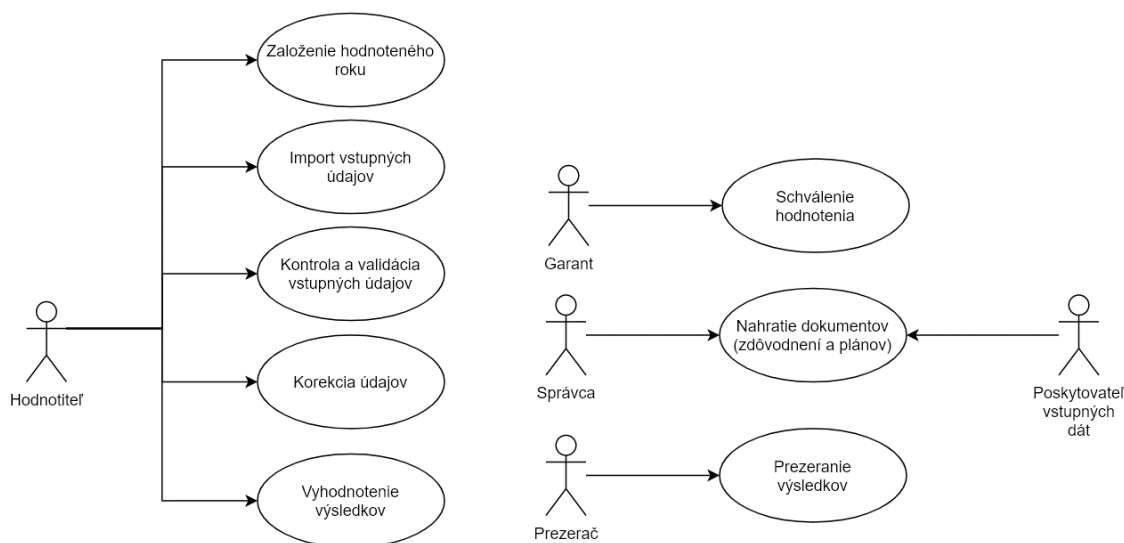
Funkčný návrh SMV je popísaný na úrovni:

1. modelu prípadov použitia (use case model), ktorý popisuje funkčný pohľad na koncových používateľov pri interakcii so systémom,
2. návrhu používateľského rozhrania, ktorý načrtáva v hrubých rysoch základné obrazovky systému (upozorňujeme, že všetky údaje sú ilustratívne a slúžia len ako príklad).

3.2.1 Model prípadov použitia

V tejto kapitole je prezentovaný funkčný popis SMV v podobe modelu prípadov použitia – use case modelu v štandardnej UML notácii [33].

3.2.1.1 Use case diagram



Obrázok 52 Use case model diagram SMV

3.2.1.2 Aktéri

Aktéri v use case modeli sú používatelia, ktorí priamo interagujú so SMV:

Aktér	Hlavná zodpovednosť	Výkon
hodnotiteľ	Zhromažďuje vstupné údaje a zabezpečuje ich import do systému v čase vyhodnotenia. Vykonáva validáciu vstupných údajov, vyhodnocuje prostredníctvom systému jednotlivé KPI a podporné štatistiky a verifikuje, prípadne koriguje výsledky.	Reálne vykonáva poverené pracovisko Slovenskej správy ciest alebo Ministerstva dopravy a výstavby SR.
garant	Zodpovedá sa údaje v systéme monitorovania výkonu. Vykonáva finálnu verifikáciu a schválenie hodnotenia.	Poverený pracovník SSC alebo MDV SR.

správca	Implementuje akcie v rámci systému hospodárenia s vozovkami na základe hodnotenia KPI. Poskytuje písomné zdôvodnenia a návrhy nápravných akcií pri nesplnení KPI.	Správca CK, ktorý podlieha hodnoteniu KPI. 1. verzia KPI: NDS, SSC
poskytovateľ vstupných dát	Poskytuje vstupné dáta v dohodnutom formáte a kvalite popísané v kap. 3.4.3. Pri nesplnení požiadaviek kvality poskytuje opravené verzie vstupných dát. Ak sa nepodarí kvôli vstupným dátam vyhodnotiť niektoré KPI, poskytne písomné zdôvodnenie situácie s návrhom nápravných opatrení.	Poskytovatelia vstupných dát popísaných v datasetoch v kap. 3.4.3. 1. verzia KPI: SSC, odbory úseku 2000
prezerač	Prezerá vyhodnotenú údaje, KPI a ďalšie štatistiky.	Strategické úrovne rozhodovania v cestnom hospodárstve; MDV SR, manažérske úrovne SSC, NDS. Odborná verejnosť, široká verejnosť.

3.2.1.3 Scenáre

V tejto kapitole sú popísané jednotlivé scenáre UC modelu bližšie.

3.2.1.3.1 Založenie hodnoteného roku

Scenár:	Založenie hodnoteného roku
Aktér:	Hodnotiteľ
Vstupné podmienky:	Pre daný rok nebolo založené hodnotenie.
Výstupné podmienky:	Vytvorené hodnotenie roka v stave „Pracovný“.
Postup:	1. Používateľ aktivuje funkciu „Nový hodnotený rok“. 2. Systém vytvorí v dátových štruktúrach nový rok a aktivuje funkcie pre import vstupných údajov.

3.2.1.3.2 Import vstupných údajov

Scenár:	Import vstupných údajov
Aktér:	Hodnotiteľ
Vstupné podmienky:	Založený hodnotený rok.

Výstupné podmienky:	Naimportované vstupné údaje pre hodnotený rok.
Postup:	1. Používateľ aktivuje funkciu import vstupných údajov. 2. Systém integračnou linkou vykoná automatizovaný import dát z dátových zdrojov (IS MCS). 3. Systém vykoná validáciu a kontrolu kvality všetkých vstupných dát. Výsledky, ako aj dáta, odprezentuje používateľovi. 4. V prípade, že všetky vstupné údaje sú vyhovujúce, používateľ schváli import údajov. 5. Systém údaje naimportuje do verzie asociovej s hodnoteným rokom.

3.2.1.3.3. Kontrola vstupných údajov

Scenár:	Kontrola vstupných údajov
Aktér:	Hodnotiteľ
Vstupné podmienky:	Naimportované vstupné údaje pre hodnotený rok.
Výstupné podmienky:	Skontrolované vstupné údaje.
Postup:	1. Používateľ aktivuje funkciu automatizovanej kontroly vstupných údajov. 2. Systém spustí kontroly kvality vstupných dát a kontroly dostupnosti kalkulačných údajov. 3. Systém odprezentuje výsledky používateľovi.

3.2.1.3.4. Korekcia údajov

Scenár:	Korekcia údajov
Aktér:	Hodnotiteľ
Vstupné podmienky:	Naimportované vstupné údaje pre hodnotený rok.
Výstupné podmienky:	Upravené vstupné údaje
Postup:	1. Používateľ aktivuje funkciu korekcie vybraných vstupných údajov. 2. Používateľ na základe externých faktorov upraví vybrané časti vstupných údajov (napríklad vo vstupných dátach sa nachádza zjavne chybné meranie, ktoré bolo opakované mimo štandardného cyklu meraní SSC CDB). Spolu s korekciou sa zapisuje do systému povinne poznámka s dôvodom korekcie a pôvodom korigovaných údajov. 3. Systém poznačí každý korigovaný údaj. Každý KPI vyhodnotený s korigovanými údajmi je označený týmto faktom a údaje o korigovaných dátach sú vždy sprievodnou súčasťou vyhodnotenia dotknutého KPI.

3.2.1.3.5. Vyhodnotenie výsledkov

Scenár:	Vyhodnotenie výsledkov
Aktér:	Hodnotiteľ
Vstupné podmienky:	Naimportované vstupné údaje pre hodnotený rok, ktoré boli prípadne korigované.
Výstupné podmienky:	Vyhodnotenú KPI.
Postup:	1. Používateľ aktivuje funkciu vyhodnotenia KPI. 2. Systém vykoná vyhodnotenie: a. pre každého správcu a KPI spočíta celkové KPI b. pre každého správcu a KPI spočíta parciálne KPI: i. pre triedy CK ii. pre okresy

3.2.1.3.6. Schválenie hodnotenia

Scenár:	Schválenie hodnotenia
Aktér:	Garant
Vstupné podmienky:	Vyhodnotenú KPI
Výstupné podmienky:	Schválené hodnotenie.
Postup:	1. Používateľ si prezrie vyhodnotenú KPI a korigované údaje. 2. V prípade, že s vyhodnotením a korekciou vstupných údajov bude súhlasiť, aktivuje funkciu schválenia hodnotenia. 3. Systém vyhodnotenú KPI uvoľní pre prezeranie.

3.2.1.3.7. Prezeranie výsledkov

Scenár:	Prezeranie výsledkov
Aktér:	Prezerač
Vstupné podmienky:	Schválené hodnotenie.
Výstupné podmienky:	Zobrazené hodnotenie v požadovanej štruktúre.
Postup:	1. Používateľ si vyberie formu zobrazenia vyhodnotenia: a. pre konkrétny rok: i. vyhodnotenú celkovú KPI ii. vyhodnotenú parciálnu KPI vzhľadom na triedy CK a okresy b. pre konkrétne KPI:

	i. trendový časový rad 2. Systém zobrazí hodnotenie v požadovanej štruktúre.
--	--

3.2.1.3.8. Nahratie dokumentov (zdôvodnení a plánov)

Scenár:	Nahratie dokumentov (zdôvodnení a plánov)
Aktér:	Správca alebo poskytovateľ vstupných údajov
Vstupné podmienky:	Nesplnené KPI (správca) Neposkytnuté vstupné dáta v požadovanej kvalite alebo termíne (poskytovateľ vstupných údajov)
Výstupné podmienky:	Nahratý dokument v SMV
Postup:	1. Používateľ aktivuje funkciu nahratia dokumentu. 2. Na výzvu používateľ nájde dokument v adresári vo svojom lokálnom počítači. 3. Používateľ dokument odošle. Systém dokument uloží.

3.2.2 Návrh používateľského rozhrania**3.2.2.1 Obrazovka Vyhodnotenie KPI – sumár**

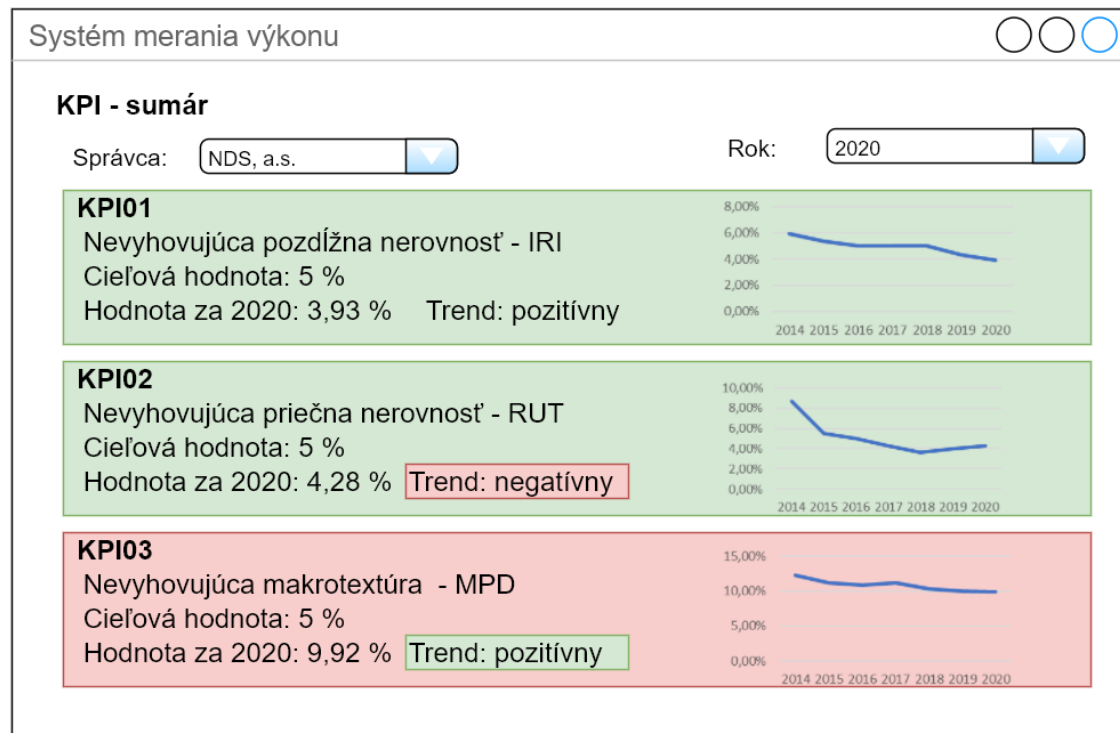
Obrazovka zobrazuje sumárne informácie o vyhodnotenom KPI za daný rok.

Súčasne je to vstupná obrazovka do systému, kde rok je implicitne filtrovaný na posledný hodnotený rok.

Pre všetky hodnotené KPI je dostupná krátka sumárna informácia v podobe karty s informáciami:

- názov KPI
- cieľová hodnota
- hodnota za daný rok
- trend: pozitívny, stabilný, negatívny
- vývoj hodnoty KPI v podobe malého prehľadového čiarového grafu na časovom ročnom rade.

Karta má zelené alebo červené pozadie podľa toho, či v danom roku KPI bolo splnené alebo nie.



Obrázok 53 Drôtený model obrazovky Vyhodnotenie KPI – sumár

3.2.2.2 Obrazovka Vyhodnotenie – Detail KPI

Obrazovka zobrazuje detailné vyhodnotenie konkrétneho KPI – parciálne vyhodnotenie v zoskupení podľa:

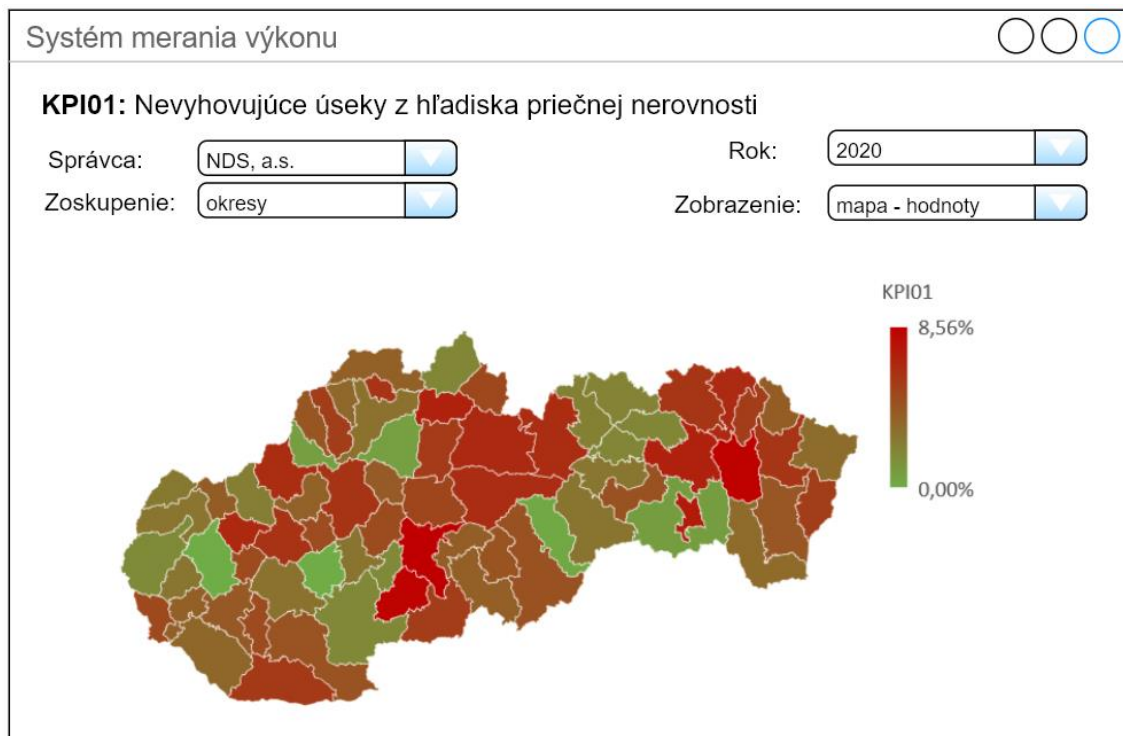
- okresov alebo
- správcov 2. úrovne alebo
- tried CK.

Vyhodnotenú KPI je možné zobrazíť vo forme:

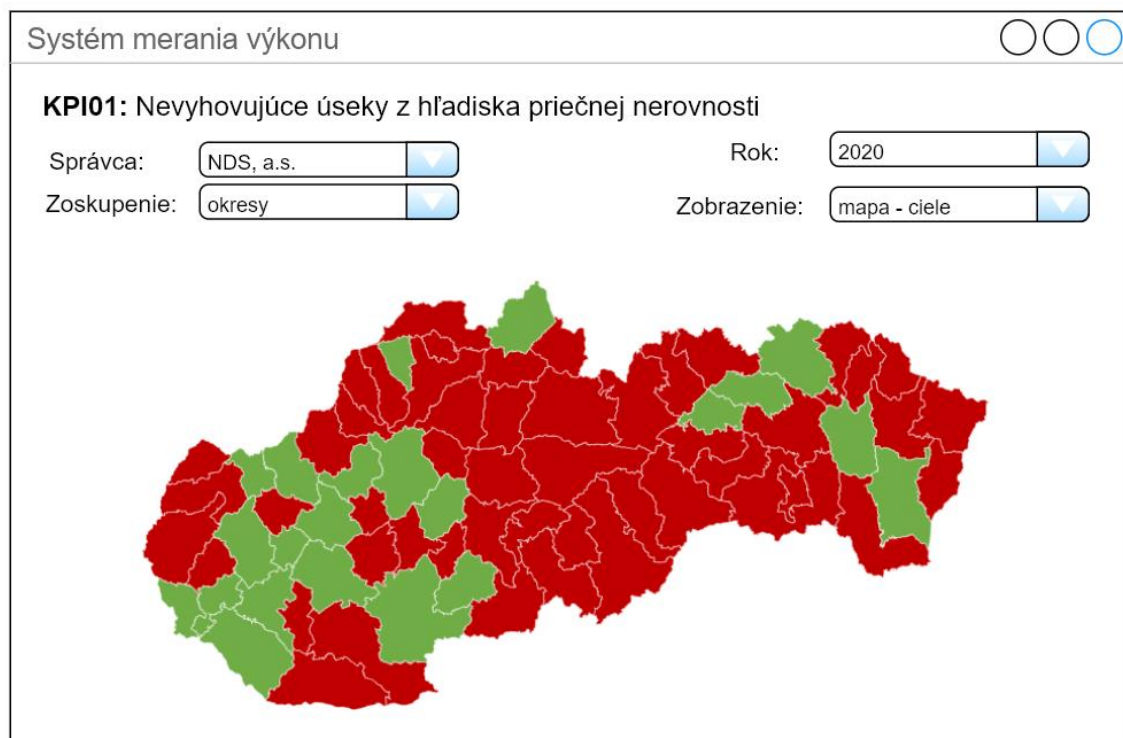
- tabuľky – všetky zoskupenia,
- mapy – zoskupenie podľa okresov alebo správcov 2. úrovne.

Mapu je možné zobrazíť ako kartogram (choropleť):

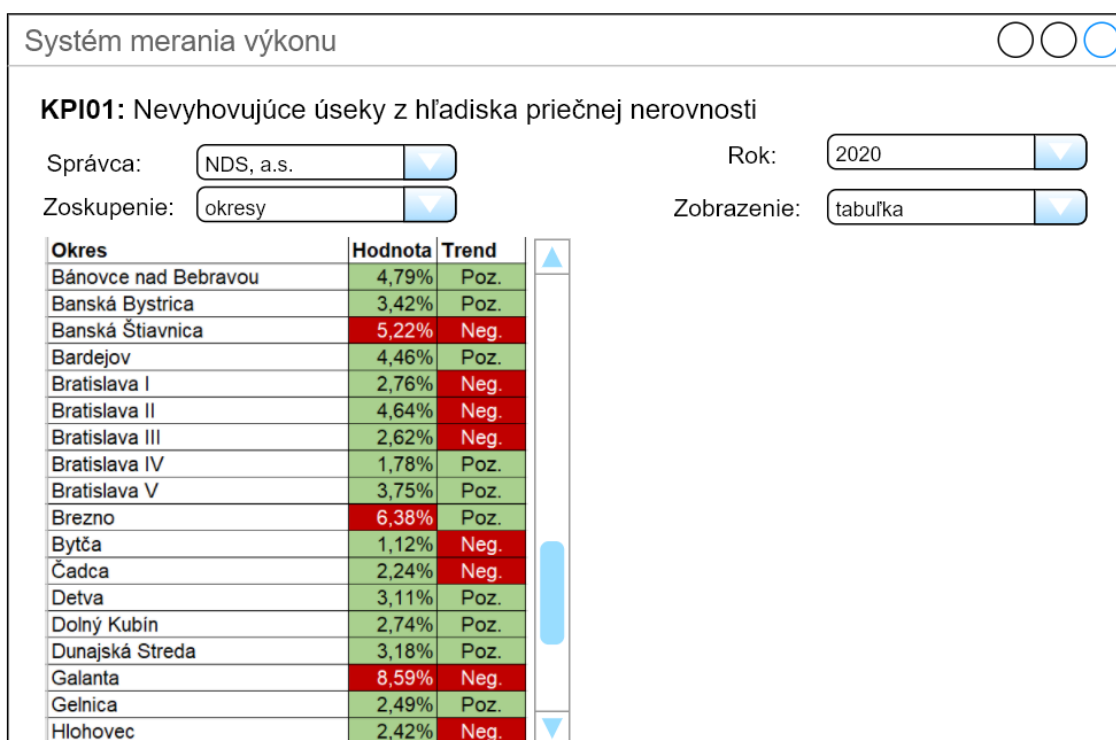
- aktuálnych hodnôt KPI alebo
- splnenia cieľovej hodnoty (binárne farby).



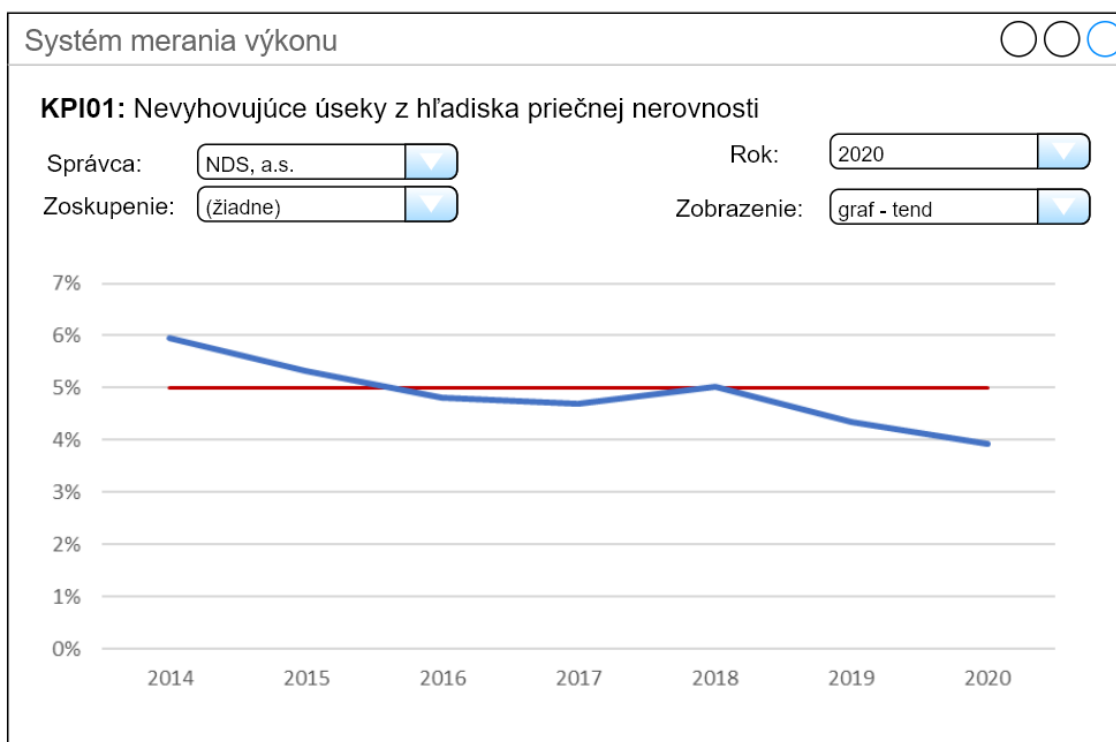
Obrázok 54 Drôtený model obrazovky Vyhodnotenie - Detail KPI - zobrazenie podľa okresov na mape hodnôt



Obrázok 55 Drôtený model obrazovky Vyhodnotenie - Detail KPI - zobrazenie podľa okresov na mape splnenia cieľu KPI



Obrázok 56 Drôtený model obrazovky Vyhodnotenie - Detail KPI - zobrazenie podľa okresov v tabuľke



Obrázok 57 Drôtený model obrazovky Vyhodnotenie - Detail KPI - zobrazenie grafu trendovej čiary

3.2.2.3 Obrazovka Správa vyhodnotení

Na obrazovke hodnotiteľ vykonáva správu jednotlivých hodnotení – za každý rok a ich verzie. Pre vyhodnotenie v novom roku zakladá príslušný nový záznam.

Schvaľovatelia tu schvaľujú verziu vyhodnotenia v danom roku.

3.2.2.4 Obrazovka Správa vstupných dát

Obrazovka slúži na správu všetkých vstupných údajov a ich import a korekcie.

3.2.2.5 Obrazovka Správa dokumentov

Na obrazovke správca a poskytovateľ údajov nahráva dokumenty s písomnými zdôvodneniami v prípade nesplnenia KPI, resp. nedodania vstupných údajov v požadovanej kvalite alebo načas.

Systém merania výkonu

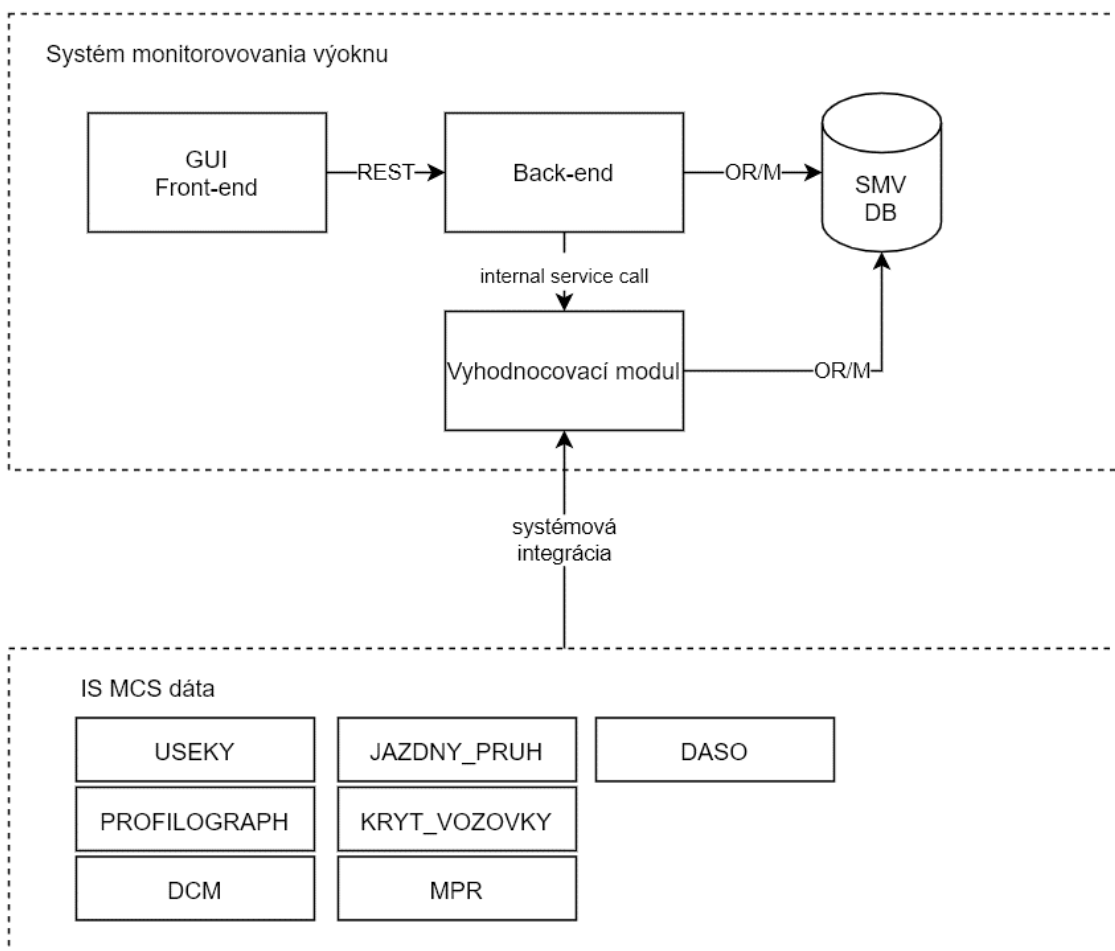
Správa dokumentov - Vyhodnotenie 2020 (v1)

Dokument	Typ dokumentu	Nahral	Dátum	Stav	
vyjadrenie_SSC.pdf	Vyjadrenie správcu k nesplneným KPI	Eleonóra Kolíková	11.6.2020	potvrdené	
vyjadrenie_SSC_2.pdf	Vyjadrenie správcu k nesplneným KPI	Martina Sadloňová	12.7.2020	nahraté	Vymazať

Nahrať dokument

3.3 Návrh technickej architektúry

Náčrt technickej architektúry SMV reprezentuje nasledovný diagram:



Jednotlivé prvky technickej architektúry SMV sú nasledovné.

Komponent	Popis
GUI Front-end	Grafické používateľské rozhranie front-endu SMV. Implementácia vo forme single-page application (SPA); štandard HTML, CSS, JavaScript.
GUI Back-end	Back-end SMV; primárne obsluhuje požiadavky pre GUI front-end. Externé služby vystavuje štandardnými službami v štýle REST vo výmennom formáte dát JSON. Back-end komunikuje s databázou SMV prostredníctvom vrstvy abstrakcie objektovo-relačného mapovania (OR/M).
SMV DB	Interná databáza SMV. Obsahuje: • snímky vstupných dát • korekcie vstupných dát • interne kalkulované dáta • vyhodnotené zmrazené dáta • dokumentačnú časť – dokumenty písomných komentárov kvality údajov poskytovateľov dát a písomných návrhov správcov na nápravy
Vyhodnocovací modul	Modul pre kalkulácie dát a vyhodnotenie. Vyhodnocovací modul komunikuje s databázou SMV prostredníctvom vrstvy abstrakcie objektovo-relačného mapovania (OR/M).
IS MCS dáta	Údaje IS MCS externé SMV, ktoré sú potrebné na vyhodnotenie KPI. Tieto dáta sú získavané v čase prípravy hodnotenia automatizovaným spôsobom cez systémovú integráciu.

3.4 Kľúčové výkonnostné indikátory (KPI) na sieti diaľnic, rýchlostných ciest a ciest I. triedy v SR

3.4.1 Úvod

V tejto kapitole sú popísané navrhované KPI hodnotiace na vozovkách:

- pozdĺžne nerovnosti – KPI01,
- priečne nerovnosti – KPI02,
- protišmykové vlastnosti – makrotextúrna zložka – KPI03,
- protišmykové vlastnosti – pozdĺžne šmykové trenie – KPI04,
- prevádzkovú výkonnosť (štruktúrnú kapacitu – únosnosť) – KPI05.

KPI01, KPI02 a KPI03 sa začnú hodnotiť už za rok 2020 v roku 2021, resp. ihneď po zavedení SMV do rutínnej prevádzky.

Vzhľadom na chýbajúce kľúčové údaje pre vyhodnotenie KPI04 (popísané nižšie), prebehne prvé parciálne vyhodnotenie KPI04 v roku 2022 za rok 2021 a úplne v roku 2024 za rok 2023.

3.4.2 Požadované merania a ich frekvencia

3.4.2.1 Merania inerciálnym laserovým profilometrom

Na vyhodnotenia indikátorov KPI01, KPI02 a KPI03 sú potrebné merania pozdĺžnej nerovnosti, priečnej nerovnosti a hĺbky makrotextúry s vyhodnotením parametrov IRI

(medzinárodný index nerovnosti), RUT (hĺbka vyjazdených koľají) a MPD (priemerná hĺbka profilu).

Tieto merania sa budú vykonávať laserovým inerciálnym profilometrom triedy 1 v súlade s rezortným predpisom raz ročne na všetkých priebežných jazdných pruhoch a prídavných stúpacích pruhoch na diaľniciach, rýchlostných cestách a cestách I. triedy. Merania je nevyhnutné vykonávať v súlade s rezortnými technickými predpismi TP 056 [34] a TP 025 [35]. Momentálne sa na tento účel využíva zariadenia Profilograph GE.

	Diaľnice a rýchlostné cesty	Cesty I. triedy
Frekvencia merania	1 × ročne	1 × ročne
Rozsah merania	všetky priebežné jazdné pruhy a prídavné stúpacie pruhy	všetky priebežné jazdné pruhy a prídavné stúpacie pruhy

3.4.2.2 Merania pozdĺžneho šmykového trenia

Vyhodnotenie KPI04 vyžaduje meranie pozdĺžneho šmykového trenia zariadením Skiddometer BV11 na úrovni cestnej siete.

Cestná databanka SSC je schopná merať týmto zariadením pri dostatočnom personálnom zabezpečení cca 70 pruhokm denne.

K 1.1.2020 bolo evidovaných 767 km diaľnic a rýchlostných ciest a 3323 km ciest I. triedy, čo približne zodpovedá 9714 pruhokm týchto cestných komunikácií.

Pri uvažovaní meraní 5 mesiacov do roka¹⁶ pri 20 pracovných dňoch to znamená výkon 7000 pruhokm ročne. Je teda reálne v priebehu 2 rokov zmerať celú cestnú sieť.

Merania sa musia robiť v zhode s platnými technickými predpismi TP 025 a STN P CEN/TS 15901-12.

	Diaľnice a rýchlostné cesty	Cesty I. triedy
Frekvencia merania	jedenkrát za 2 roky	jedenkrát za 2 roky
Rozsah merania	všetky priebežné jazdné pruhy a prídavné stúpacie pruhy	všetky priebežné jazdné pruhy a prídavné stúpacie pruhy

3.4.2.3 Merania únosnosti deflektometrom

Na vyhodnotenie indikátora KPI05 je potrebné meranie priehybovej krivky. V súčasnosti existuje technický prepis len na merania rázovým deflektometrom (FWD) podľa TP 031 [36].

Momentálne sa tieto merania nerealizujú na úrovni cestnej siete, čo je jeden z dôvodov, prečo KPI05 zatiaľ nie je možné vyhodnocovať.

Rázový deflektometer nie je vysokopacitné zariadenie (kapacita merania pri rozstupe 200 m je cca 15 pruhokm denne): na zmeranie celej diaľničnej siete a ciest I. triedy (orientčne 9714 pruhokm) je potrebných približne 648 meracích dní. Pri predpokladanom možnom vyťažení 5 meracích mesiacov v roku a 20 pracovných dní v mesiaci to znamená 6,48 roka jedným zariadením FWD KUAB, resp. 3,24 roka dvoma zariadeniami FWD KUAB, ktorými SSC disponuje. Dvoma zariadeniami by bolo tak možné naplánovať merania na úrovni cestnej siete v štvorročnej frekvencii.

Rázový deflektometer sa však okrem nízkeho meracieho výkonu potýka s týmito problémami:

¹⁶ Merania sa musia robiť na neznečistenom povrchu pri vhodnom počasí a je potrebné odpočítat dovolenky, servis, merania pre potreby projektovej úrovne SHV a pod.).

- príliš veľký merací rozostup (200 m, resp. 100 m šachovnicovo):
 - pre zaistenie opakovateľnosti a nadväznosti jednotlivých vyhodnotení je potrebné zabezpečiť opakované merania medzi jednotlivými intervalmi na rovnakých alebo aspoň približne rovnakých miestach na celej cestnej sieti, čo môže byť v praxi náročné,
 - diskutabilná je aj možnosť využitia údajov v takto širokom rozostupe pri ďalších rozhodovacích procesoch – je možné napríklad hľadať homogénne úseky len dlhšie ako cca 500 m s nepresnosťou ich lokalizácie ± 100 až 200 m podľa zvolenej metodiky. Na sieťovej úrovni by bolo žiaduce používať vzorkovací krok 20 m alebo menej (porovnaj aj závery v [37]),
 - lokálne diskontinuity v únosnosti o dĺžke kratšej ako 100 metrov nie je možné zaznamenať vôbec,
- zariadenie v stacionárnej polohe pri meraní predstavuje nebezpečenstvo pre vodičov, ako aj meráciu posádku a tiež prekážku v plynulosti cestnej premávky.

Všetky tieto problémy rieši vysokorýchlostný deflektometer (TSD), ktorý meria priehybové charakteristiky vozovky pri dynamickom (pohyblivom) zaťažení v cestovnej rýchlosti (40 až 90 km/h). Pri pohybe zariadenia laserové snímače s využitím Dopplerovho javu merajú rýchlosti vertikálnej deformácie vozovky pod zaťažovacím nosníkom. Integráciou rýchlostí je možné získať priehybovú krivku a aplikovať analogické postupy ako pri analýze dát FWD, ak to je potrebné (s výhradou, že statický rázový mechanizmus zaťaženia pri FWD je iný ako dynamické zaťaženie pri TSD [38]). Na túto tému bola vypracovaná v SR aj samostatná rozborová úloha v roku 2015 [39]. Dáta sú merané kontinuálne (pri rýchlosti 80 km/h nie je problém získať dáta každých 10 m).

TSD momentálne vlastnia organizácie v 5 krajinách v Európe (Dánsko, Veľká Británia, Taliansko, Poľsko, Nemecko).

Vzhľadom na odlišnosti pri statickom rázovom meraní únosnosti zariadením FWD a dynamickom meraní zariadením TSD sa nedá očakávať presná číselná zhoda v nameraných priehyboch [40]. Zahraničná prax však potvrdzuje, že TSD je schopné identifikovať úseky so zhoršenou alebo nevyhovujúcou únosnosťou [41] a dajú sa aj odvodiť korelačné vzťahy medzi TSD a FWD [40], [39], [38]. Niektoré krajiny používajú TSD už aj na úrovni projektu alebo ako merania pri preberaní stavby s následnou prípadnou penalizáciou dodávateľa (napr. Taliansko).

Nevyhnutne potrebné je pripraviť TP pre meranie a vyhodnotenie údajov TSD. Z hľadiska systému merania výkonu sa požaduje, aby v TP bola stanovená aspoň dvojstupňová klasifikácia únosnosti (únosnosť vyhovuje/nevyhovuje) alebo ešte lepšie aspoň trojstupňová klasifikácia (vyhovuje, varovný stav, kritický stav) alebo klasická päťstupňová klasifikácia.

Vzhľadom na uvedené sa požaduje na hodnotenie KPI05 zabezpečiť prostredníctvom SSC merania únosnosti na úrovni cestnej siete vysokorýchlostným deflektometrom (TSD), a to minimálne na diaľniciach, rýchlostných cestách a cestách I. triedy. Tieto údaje sa využijú súčasne pre rozhodovacie procesy systému hospodárenia s vozovkami (SHV) na úrovni cestnej siete.

3.4.3 Vstupné dáta

3.4.3.1 Úseky referenčnej siete

Kód:	USEKY		
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky		
Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku.
	NazovUseku	text	Názov úseku.
	EvidencnaDlžka	celé číslo	Evidenčná dĺžka úseku v metroch.
	Okres	celé číslo	Kód okresu podľa štatistického číselníka okresov.
	Spravca_1	celé číslo	Kód CTEPK správcu 1. úrovne
	Spravca_2	celé číslo	Kód CTEPK správcu 2. úrovne.
	Spravca1_Text	text	Názov správcu 1. úrovne.
	Spravca2_Text	text	Názov správcu 2. úrovne.
	CisloCk	text	Číslo CK (formátované).
	Typ	znak	Kód typu úseku. N = medzikrižovateľský úsek, L = lúč, V = vetva, P = privádzač.
	Smer	celé číslo	Kód smeru úseku. 0 = obojsmerný, 1 = jednosmerný v smere orientácie CK, 2 = jednosmerný v protismere orientácie CK.

3.4.3.2 Dáta z meraní zariadením Profilograph GE

Kód:	PROFILOGRAPH		
Popis:	Najnovšie elementárne merané hodnoty z meraní jazdných pruhov zariadením Profilograph GE. Vyhodnocovací krok 20 m. Len merania schválené garantom odd. diagnostiky vozoviek.		
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky		
Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	SscId	UUID	Jednoznačný identifikátor elementárnej meranej hodnoty.
	IRI	desatinné číslo	Nameraná hodnota IRI v mm/m.
	RUT	desatinné číslo	Nameraná hodnota hĺbky vyjazdených koľají (RUT) v mm.
	MPD	desatinné číslo	Nameraná priemerná hĺbka profilu (MPD) v mm.
	Nepresnost	text(3)	Kód zaznamenananej udalosti, ktorá môže spôsobiť nepresnosť nameraných dát.
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicienieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku elementárnej meranej hodnoty v m.
	StanicienieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie konca elementárnej meranej hodnoty v m.
	DatumMerania	dátum	Dátum merania.
	Umiestnenie	celé číslo	Kód jazdného pruhu, resp. umiestnenia vzhľadom na priečny rez CK z pohľadu orientácie CK na úsekoch v smere 0 a 1 a z pohľadu proti orientácii CK na úsekoch v smere 2: 1 – pravý, 2 – stredný, 3 – ľavý, 12 – prídavný pruh pre pomalé vozidlá,

			13 – prídavný pruh pre rýchle vozidlá.
Vstupná kontrola kvality:	Hodnoty IRI, RUT a MPD sú väčšie ako 0 na všetkých úsekoch meraní. Žiadny záznam sa neprekrýva so žiadnym iným. Pre každý záznam z na úseku u (po spojení s USEKY cez $UsekId$) platí, že: • $z.staniceZaciatku > 0$ • $z.staniceZaciatku \leq z.staniceKonca$ • $z.staniceKonca \leq u.evidencnaDlzska$ Tieto kritériá musia platiť na 100 % záznamoch v tabuľke PROFILOGRAPH. Pre každého hodnoteného správcu <i>maint</i>: Nech $T1$:= záznamy z tabuľky PROFILOGRAPH, kde: • <i>umiestnenie</i> je 1,2,3,12 alebo 13 • $ROK(datumMerania) = hodnotiaciRok$ alebo $hodnotiaciRok-1$, Nech $T2$:= záznamy z tabuľky JAZDNY_PRUH JOIN USEK, kde: • <i>jePrídavny</i>=0 alebo <i>typPruhu</i>=6 • $USEK.Typ = N$ alebo $USEK.Typ = L$ • $USEK.Spravca_L1 = maint$ Spoj tabuľku $T1$ s tabuľkou $T2$ sprava, že vznikne tabuľka homogénnych lineárnych udalostí, označ ju $T3$. V každej homogénnej lineárnej udalosti spočítaj počet spojených záznamov z tabuľky $T1$ a tabuľky $T2$. Pokiaľ k záznamom z tabuľky $T2$ neexistuje spárovaný záznam z $T1$, počet z $T1$ je 0. Nech rozdiel týchto počtov v každom zázname tabuľky $T3$ je <i>ChybPruhy</i>. Dĺžkový podiel záznamov $T3$, kde <i>ChybPruhy</i> $\neq 0$, môže byť najviac 5 %. Inými slovami najviac na 5 % dĺžky vstupných úsekov môžu chýbať merania Profilographom GE na všetkých priebežných a stúpacích prídavných pruhoch, ktoré nie sú staršie ako 2 roky (ročný požadovaný interval merania + 1 rok systémová tolerancia).		

3.4.3.3 Dáta z meraní zariadením Skiddometer

Kód:	SKIDDOMETER
Popis:	Najnovšie elementárne merané hodnoty z meraní jazdných pruhov zariadením Skiddometer BV11. Vyhodnocovací krok 20 m. Len merania schválené garantom odd. diagnostiky vozoviek.
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky

Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	SscId	UUID	Jednoznačný identifikátor elementárnej meranej hodnoty.
	Mu	desatinné číslo	Nameraná hodnota Mu.
	RychlostPriMerani	desatinné číslo	Rýchlosť meracieho vozidla pri meraní [km/h].
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku elementárnej meranej hodnoty v m.
	StanicieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie konca elementárnej meranej hodnoty v m.
	DatumMerania	dátum	Dátum merania.
	Umiestnenie	celé číslo	Kód jazdného pruhu, resp. umiestnenia vzhľadom na priečny rez CK z pohľadu orientácie CK na úsekoch v smere 0 a 1 a z pohľadu proti orientácii CK na úsekoch v smere 2: 1 – pravý, 2 – stredný, 3 – ľavý, 12 – prídavný pruh pre pomalé vozidlá, 13 – prídavný pruh pre rýchle vozidlá.
Vstupná kontrola kvality:	Hodnoty <i>Mu</i> a <i>Rychlost</i> sú väčšie ako 0 na všetkých úsekoch meraní. Žiadny záznam sa neprekrýva so žiadnym iným. Pre každý záznam <i>z</i> na úseku <i>u</i> (po spojení s USEKY cez <i>UsekId</i>) platí, že: • $z.stanicieZaciatku > 0$ • $z.stanicieZaciatku \leq z.stanicieKonca$ • $z.stanicieKonca \leq u.evidencnaDlзка$ Tieto kritériá musia platiť na 100 % záznamoch v tabuľke SKIDDOMETER. Pre každého hodnoteného správcu <i>maint</i>:		

	Nech $T1$:= záznamy z tabuľky SKIDDOMETER, kde: $umiestnenie$ je 1,2,3,12 alebo 13 $ROK(datumMerania) = hodnotiaciRok$ alebo $hodnotiaciRok-3$, Nech $T2$:= záznamy z tabuľky JAZDNY_PRUH JOIN USEK, kde: $jePrídavny=0$ alebo $typPruhu=6$ $USEK.Typ = N$ alebo $USEK.Typ = L$ $USEK.Spravca_L1 = maint$ Spoj tabuľku $T1$ s tabuľkou $T2$ sprava, že vznikne tabuľka homogénnych lineárnych udalostí, označ ju $T3$. V každej homogénnej lineárnej udalosti spočítaj počet spojených záznamov z tabuľky $T1$ a tabuľky $T2$. Pokiaľ k záznamom z tabuľky $T2$ neexistuje spárovaný záznam z $T1$, počet z $T1$ je 0. Nech rozdiel týchto počtov v každom zázname tabuľky $T3$ je $ChybPruhy$. Dĺžkový podiel záznamov $T3$, kde $ChybPruhy \neq 0$, môže byť najviac 5 %. Inými slovami najviac na 5 % dĺžky vstupných úsekov môžu chýbať merania Skiddometrom BV1 na všetkých priebežných a stúpacích prídavných pruhoch, ktoré nie sú staršie ako 3 roky (dvojročný požadovaný interval + jeden rok systémová tolerancia).
--	--

3.4.3.4 Lokalizácie dilatačných celkov mostov

Kód:	DCM		
Popis:	Lokalizácia každého dilatačného celku mosta evidovaná v CTEPK.		
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky		
Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	IdentifikacneCislo	text	Jednoznačné identifikačné číslo DCM v tvare IDM.PoradovéČísloDCM
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicienieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku DCM v m.
	StanicienieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie konca DCM m.

3.4.3.5 Jazdné pruhy

Kód:	JAZDNY_PRUH
Popis:	Údaje o jazdných pruhoch CTEPK.
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky

Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	SscId	UUID	Jednoznačný identifikátor záznamu.
	JePridavny	áno/nie	Nie, ak pruh je priebežný; inak áno.
	TypPruhu	text(5)	Kód typu pruhu.
	DopravnySmer	celé číslo	Kód dopravné smeru: 1 – súhlasný s orientáciou úseku, 2 – nesúhlasný s orientáciou úseku.
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicienieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.
	StanicienieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.
Vstupná kontrola kvality:	Pre každý hodnotený úsek u v USEKY musí existovať na každej jeho evidenčnej časti aspoň jeden záznam v JAZDNY_PRUH. Pre každý hodnotený úsek u v USEKY tak, že $u.smer = 0$ musia existovať na každej jeho evidenčnej časti aspoň dva záznamy v JAZDNY_PRUH $z1$ a $z2$ také, že $z1.dopravnySmer \neq z2.dopravnySmer$. Uvedené kritériá musia platiť na 100 % evidenčnej dĺžky všetkých hodnotených úsekov.		

3.4.3.6 Typ krytu vozovky

Kód:	KRYT_VOZOVKY		
Popis:	Zaznamenaný typ krytu vozovky v CTEPK.		
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky		
Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	SscId	UUID	Jedinečný identifikátor záznamu.
	TypKrytuVozovky	text(3)	Kód typu krytu vozovky: 1 – dláždený 2 – betónový 4 – štrkový 5 – drevený

			6 – valcovaný 7 – bitúmenový T – nespevnený
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.
	StanicieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.
Vstupná kontrola kvality:	Pre každý hodnotený úsek <i>u</i> v USEKY musí existovať na každej jeho evidenčnej časti práve jeden záznam z tabuľky. KRYT_VOZOVKY, pre ktorý platí, že <i>z.TypKrytuVozovky</i> ≠ 997 & <i>z.TypKrytuVozovky</i> ≠ 998 & <i>z.TypKrytuVozovky</i> ≠ 999. Uvedené kritérium musí platiť na 100 % evidenčnej dĺžky všetkých hodnotených úsekov.		

3.4.3.7 Maximálna povolená rýchlosť

Kód:	MPR		
Popis:	Maximálna povolená rýchlosť. Údaj odvodený zo zvislého dopravného značenia, križovatiek a všeobecnej právnej úpravy.		
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky		
Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	ObjectId	celé číslo	Jedinečný identifikátor záznamu.
	MPR	celé číslo	Maximálna povolená rýchlosť [km/h].
	Umiestnenie	celé číslo	Kód umiestnenia platnosti: L – vľavo P – vpravo S – v strede
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.
	StanicieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.

Vstupná kontrola kvality:	Pre každý záznam z z MPR musí platiť, že $z.MPR > 0$. Pre každý hodnotený úsek u v USEKY musí existovať na každej jeho evidenčnej časti práve jeden záznam z MPR, pre ktorý platí, že $z.Umiestnenie = P$. Uvedené kritérium musí platiť na 100 % evidenčnej dĺžky všetkých hodnotených úsekov.
----------------------------------	---

3.4.3.8 Dokončené akcie súvislej údržby, opráv a rekonštrukcií

Kód:	DASO		
Popis:	Lokalizácia, dátum a typ dokončenej súvislej údržby, opravy alebo rekonštrukcie vozovky v existujúcej trase CK.		
Poskytovateľ:	SSC, Odbor cestnej databanky		
Dátum:	1.3. vyhodnocovacieho roku za hodnotený rok		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	ID	celé číslo	Jednoznačný identifikátor záznamu poskytovateľa (z ActionLocalizationId)
	HlbkaFrezovania	celé číslo	Hĺbka frézovania v mm.
	VyskaVyrovnania	celé číslo	Výška vyrovnania v mm.
	TypAkczie	celé číslo	Typ akcie (SÚ, O, R)
	Technologia	celé číslo	Kód technológie.
	DatumPrebratia	dátum	Dátum prebratia stavby investorom.
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicienieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.
	StanicienieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku platnosti tohto záznamu v m.

3.4.4 Odvođené vstupné údaje

Tieto údaje budú autonómne počítané v SMV z importovaných vstupných dát.

3.4.4.1 Reprezentatívna hodnota IRI, RUT a MPD jazdného pásu

Kód:	PROFILOGRAPH_REP_JP		
Popis:	Reprezentatívne hodnoty IRI, RUT a MPD na úrovni jazdného pásu.		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	IRI	desatinné číslo	Reprezentatívna hodnota IRI v mm/m.

	RUT	desatinné číslo	Reprezentatívna hodnota hĺbky vyjazdených koľají (RUT) v mm.
	MPD	desatinné číslo	Reprezentatívna priemerná hĺbka profilu (MPD) v mm.
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku elementárnej meranej hodnoty v m.
	StanicieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie konca elementárnej meranej hodnoty v m.
	DatumMerania	dátum	Dátum merania.
	Umiestnenie	POLE(cele číslo)	Pole kódov jazdných pruhov, z ktorých vznikla reprezentatívna hodnota.
Algoritmus kalkulácie:	Nech $T3$ je tabuľka vypočítaná rovnako ako tabuľka $T3$ vo vyhodnotení vstupnej kvality tabuľky PROFILOGRAPH. Nech T je tabuľka lineárnych homogénnych udalostí vzhľadom na <i>umiestnenie</i> z tabuľky PROFILOGRAPH na miesta, kde $T3.ChybPruh = 0$. Inými slovami, T obsahuje záznamy lineárnych homogénnych udalostí, ktoré sú zoznamy záznamov z tabuľky PROFILOGRAPH, ktoré sú časti elementárnych meraní na rovnakom úseku RS vo všetkých priebežných a prídavných pruhoch pre pomalé a rýchle vozidlá a boli merané v roku vyhodnotenia alebo rok pred tým. Tieto sú v T označené atribútom <i>ProfilographRows</i> Potom PROFILOGRAPH_REP_JP obsahuje pre každý záznam t z T záznam z taký, že: • $z.usekId = t.usekId$ • $z.stanicieZaciatku = t.stanicieZaciatku$ • $z.stanicieKonca = t.stanicieKonca$ • $z.IRI = PRIEMER(t.ProfilographRows.IRI)$ • $z.RUT = MAX(t.ProfilographRows.RUT)$ • $z.MPD = MIN(t.ProfilographRows.MPD)$ Teda reprezentatívna hodnota: • IRI je priemerom z IRI jazdných pruhov • RUT je maximom z RUT jazdných pruhov, • MPD je minimom z MPD jazdných pruhov.		

3.4.4.2 Reprezentatívna hodnota Mu80 jazdného pásu

Kód:	PROFILOGRAPH_REP_JP		
Popis:	Reprezentatívne hodnoty IRI, RUT a MPD na úrovni jazdného pásu.		
Štruktúra:	Atribút	Dátový typ	Popis
	Mu80	desatinné číslo	Reprezentatívna hodnota Mu80 (bezrozmerné číslo).
	UsekId	celé číslo	Jednoznačný identifikátor úseku RS.
	StanicieZaciatku	celé číslo	Úsekové staničenie začiatku elementárnej meranej hodnoty v m.
	StanicieKonca	celé číslo	Úsekové staničenie konca elementárnej meranej hodnoty v m.
	DatumMerania	dátum	Dátum merania.
	Umiestnenie	POLE(cele číslo)	Pole kódov jazdných pruhov, z ktorých vznikla reprezentatívna hodnota.
Algoritmus kalkulácie:	Nech $T3$ je tabuľka vypočítaná rovnako ako tabuľka $T3$ vo vyhodnotení vstupnej kvality tabuľky <i>SKIDDOMETER</i>. Nech T je tabuľka lineárnych homogénnych udalostí vzhľadom na <i>umiestnenie</i> z tabuľky <i>SKIDDOMETER</i> na miesta, kde $T3.ChybPruh = 0$. Inými slovami, T obsahuje záznamy lineárnych homogénnych udalostí, ktoré sú zoznamy záznamov z tabuľky <i>SKIDDOMETER</i>, ktoré sú časti elementárnych meraní na rovnakom úseku RS vo všetkých priebežných a prídavných pruhoch pre pomalé a rýchle vozidlá a boli merané v roku hodnotenia alebo najviac 2 roky pred tým. Tieto sú v T označené atribútom <i>SkiddometerRows</i>. Pre každý riadok r v $T.SkiddometerRows$ spočítaj nový atribút $Mu80 = k_{80}(r.RychlostPriMerani) * r.Mu$. Prepočtový koeficient k_{80} sa určí funkciou: $k_{80}(v_m) = \begin{cases} 0,0035 \cdot v_m + 0,72 & \text{ak } v_m \leq 80 \text{ km/h} \\ 0,008 \cdot v_m + 0,36 & \text{ak } 80 < v_m \leq 100 \text{ km/h} \\ 1,16 & \text{ak } v_m > 100 \text{ km/h} \end{cases}$ kde v_m je rýchlosť pri meraní [km/h]. Potom <i>SKIDDOMETER_REP_JP</i> obsahuje pre každý záznam t z T záznam z taký, že: $z.usekId = t.usekId$		

	• $z.staniceZaciatku = t.staniceZaciatku$ • $z.staniceKonca = t.staniceKonca$ • $z.Mu80 = MIN(t.SkiddometerRows.Mu80)$. Teda reprezentatívna hodnota Mu na úrovni jazdného pásu je minimom z hodnôt Mu80 v príslušných jazdných pruhoch, čo sú namerané hodnoty Mu prepočítané na porovnávaciu rýchlosť 80 km/h interpolovaným regresným vzorcom.
--	---

3.4.5 Definičná množina a kalkulačné dáta

Pre každé KPI je definovaná množina vstupných dát, a to:

1. *definičná množina* – množina úsekov cestnej siete, na ktorých je KPI definované,
2. *kalkulačné dáta* – množina vstupných dát potrebných pre vyhodnotenie podkladovej metriky.

Definičná množina je definovaná typicky filtračnými podmienkami vzhľadom na úseky referenčnej siete; nemusia to byť celé úseky referenčnej siete. Napríklad pokiaľ sa KPI hodnotí len na vozovkách s asfaltovým krytom, definičná množina budú časti úsekov referenčnej siete, pretože typ krytu vozovky je v CTEPK evidovaná ako lineárna udalosť na úsekoch referenčnej siete.

Kalkulačné dáta sú údaje na lokalizované na definičných dátach, vzhľadom na ktoré je definovaná podkladová metrika pre výpočet hodnoty KPI. Každé KPI presne stanovuje, akým spôsobom sa kalkulačné dáta získavajú. Súčasťou takejto predpisu sú aj podmienky kvality na kalkulačné dáta.

3.4.6 Indikátor KPI01 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska pozdĺžnych nerovností

Kód indikátora:	KPI01
Názov:	Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska pozdĺžnych nerovností
Definičná množina:	Všetky medzikrižovateľské úseky a lúče zložitých križovatiek.
Kalkulačné dáta:	Premenný technický parameter IRI – reprezentatívna hodnota IRI na úrovni jazdného pásu agregovaná funkciou <i>priemer</i> z meraní na jednotlivých jazdných pruhoch. Merania IRI na jazdných pruhoch sa realizujú laserovým inerciálnym profilometrom podľa rezortného technického predpisu [34] a vyhodnocujú sa v kroku 20 m. Meranie sa agreguje zo všetkých priebežných a stúpacích jazdných pruhov. Kalkulačné dáta sú v tabuľke PROFILOGRAPH_REP_JP.
Cieľová hodnota:	< 5 % na diaľniciach a rýchlostných cestách < 10 % na cestách I. triedy
Požadovaný trend:	klesajúci
Algoritmus vyhodnotenia:	Vstupné parametre: • <i>maint</i> – správca,

	• <i>region</i> – okres, Použité dátové zdroje: • USEKY • PROFILOGRAPH_REP_JP Postup: 1. # Definičná množina Nech DM := riadky <i>u</i> z USEKY, kde: a. <i>u.typ</i> = N alebo <i>u.typ</i> = L, b. <i>u.spravca_L1</i> = <i>maint</i>, c. <i>okres</i> = <i>region</i>, ak <i>region</i> nie je NULL 2. # Kalkulačné dáta Nech P := riadky <i>p</i> z PROFILOGRAPH_REP_JP lokalizované na DM. Hodnota KPI: $KPI_{01}(maint, region) = \frac{\sum_{p \in P} bs_1(p) \cdot l(p)}{\sum_{p \in P} l(p)} \cdot 100 \%$ kde: <i>bs₁(p)</i> je 1, ak <i>p.IRI</i> > 5,0; inak 0 <i>l(p)</i> je <i>p.stanícenieZaciatku</i> – <i>p.stanícenieKonca</i> Pre správcu sú záväzné len celoplošné KPI; hodnoty KPI na okresoch sú len doplnkové.
--	---

3.4.7 Indikátor KPI02 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska hĺbky vyjazdených koľají

Kód indikátora:	KPI02
Názov:	Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska hĺbky vyjazdených koľají
Definičná množina:	Všetky medzikrižovateľské úseky a lúče zložitých križovatiek na vozovkách s asfaltovým krytom.
Kalkulačné dáta:	Premenný technický parameter RUT – reprezentatívna hodnota RUT na úrovni jazdného pásu agregovaná funkciou <i>maximum</i> z meraní na jednotlivých jazdných pruhoch. Merania RUT na jazdných pruhoch sa realizujú laserovým inerciálnym profilometrom podľa rezortného technického predpisu [34] a vyhodnocujú sa v kroku 20 m. Meranie sa agreguje zo všetkých priebežných a stúpacích jazdných pruhov. Kalkulačné dáta sú v tabuľke PROFILOGRAPH_REP_JP.
Cieľová hodnota:	< 5 % na diaľniciach a rýchlostných cestách < 10 % na cestách I. triedy

Požadovaný trend:	klesajúci
Algoritmus vyhodnotenia:	Vstupné parametre: <i>maint</i> – správca, <i>region</i> – okres, Použité dátové zdroje: - USEKY - PROFILOGRAPH_REP_JP Postup: # Definičná množina Nech DM := riadky <i>u</i> z USEKY, kde: <i>u.typ</i> = N alebo <i>u.typ</i> = L, <i>u.spravca_L1</i> = <i>maint</i>, <i>okres</i> = <i>region</i>, ak <i>region</i> nie je NULL, <i>kv.typKrytuVozovky</i> = 7 (<i>bitúmenový kryt</i>) pre priestorovo zodpovedajúci záznam <i>kv</i> z tabuľky KRYT_VOZOVKY # Kalkulačné dáta Nech P := riadky <i>p</i> z PROFILOGRAPH_REP_JP lokalizované na DM. Hodnota KPI: $KPI_{02}(maint, region) = \frac{\sum_{p \in P} bs_2(p) \cdot l(p)}{\sum_{p \in P} l(p)} \cdot 100 \%$ kde: <i>bs₂(p)</i> je 1, ak <i>p.RUT</i> > 15,0; inak 0 <i>l(p)</i> je <i>p.staniceZaciatku</i> – <i>p.staniceKonca</i> Pre správcu sú záväzné len celoplošné KPI; hodnoty KPI na okresoch sú len doplnkové.

3.4.8 Indikátor KPI03 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska priemernej hĺbky makrotextúry (protišmykové vlastnosti)

Kód indikátora:	KPI03
Názov:	Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska priemernej hĺbky makrotextúry kvôli zníženým protišmykovým vlastnostiam
Definičná množina:	Všetky medzikrižovatkové úseky a lúče zložitých križovatiek.
Kalkulačné dáta:	Premenný technický parameter MPD – reprezentatívna hodnota MPD na úrovni jazdného pásu agregovaná funkciou <i>minimum</i> z meraní na jednotlivých jazdných pruhoch.

	Merania MPD na jazdných pruhoch sa realizujú laserovým inerciálnym profilometrom podľa rezortného technického predpisu [34] a vyhodnocujú sa v kroku 20 m. Meranie sa agreguje zo všetkých priebežných a stúpacích jazdných pruhov. Kalkulačné dáta sú v tabuľke PROFILOGRAPH_REP_JP.
Cieľová hodnota:	5 %
Požadovaný trend:	klesajúci
Algoritmus vyhodnotenia:	Vstupné parametre: • <i>maint</i> – správca, • <i>region</i> – okres, Použité dátové zdroje: • USEKY • PROFILOGRAPH_REP_JP • MPR Postup: # Definičná množina Nech DM := riadky u z USEKY, kde: $u.typ = N$ alebo $u.typ = L$, $u.spravca_L1 = maint$, $okres = region$, ak <i>region</i> nie je NULL, # Kalkulačné dáta Nech $P1$:= riadky p z PROFILOGRAPH_REP_JP lokalizované na DM. Nech P := spoj $P1$ s MPR tak, že vzniknú lineárne homogénne udalosti vzhľadom na $P1$; nech spojené záznamy z MPR sú označené ako $MPRRows$. Do príslušného záznamu p v P ulož ako $MPR := \max(MPRRows.MPR)$, t.j. hodnotu MPR v zázname PROFILOGRAPH_REP_JP nastav ako maximálnu hodnotu spomedzi všetkých záznamov o MPR z tabuľky MPR. Hodnota KPI: $KPI_{03}(maint, region) = \frac{\sum_{p \in P} bs_3(p) \cdot l(p)}{\sum_{p \in P} l(p)} \cdot 100 \%$ kde: $bs_3(p) = \begin{cases} p.MPR \leq 50 \wedge p.MPD \leq 40 \vee \\ 1, \text{ ak } 50 < p.MPR \leq 90 \wedge p.MPD \leq 0,55 \vee \\ p.MPR > 90 \wedge p.MPD \leq 0,70 \\ 0, \text{ inak} \end{cases}$ $l(p)$ je $p.stanicienieZaciatku - p.stanicienieKonca$

	Pre správcu sú záväzné len celoplošné KPI; hodnoty KPI na okresoch sú len doplnkové.
--	--

3.4.9 Indikátor KPI04 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska pozdĺžneho šmykového trenia (protišmykové vlastnosti)

Kód indikátora:	KPI04
Názov:	Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska pozdĺžneho šmykového trenia
Definičná množina:	Všetky medzikrižovatkové úseky a lúče zložitých križovatiek.
Kalkulačné dáta:	Premenný technický parameter μ – reprezentatívna hodnota μ na úrovni jazdného pásu agregovaná funkciou <i>minimum</i> z meraní na jednotlivých jazdných pruhoch. Merania μ na jazdných pruhoch sa realizujú zariadením Skiddometer BV11 podľa TP 025 a STN P CEN/TS 15901-12 a vyhodnocujú sa v kroku 20 m. Pri rýchlosti merania inej ako 80 km/h sa μ normalizuje podľa vzorcov uvedených pri popise tabuľky SKIDDOMETER_REP_JP (pozri 0). Samotná klasifikácia úsekov vychádza z STN 73 6195. Meranie sa agreguje zo všetkých priebežných a stúpacích jazdných pruhov. Kalkulačné dáta sú v tabuľke SKIDDOMETER_REP_JP.
Cieľová hodnota:	5 %
Požadovaný trend:	klesajúci
Algoritmus vyhodnotenia:	Vstupné parametre: <i>maint</i> – správca, <i>region</i> – okres, Použité dátové zdroje: - USEKY - SKIDDOMETER_REP_JP Postup: # Definičná množina Nech $DM :=$ riadky u z USEKY, kde: $u.typ = N$ alebo $u.typ = L$, $u.spravca_L1 = maint$, $okres = region$, ak <i>region</i> nie je NULL # Kalkulačné dáta Nech $P :=$ riadky p z SKIDDOMETER_REP_JP lokalizované na DM. Hodnota KPI:

	$KPI_{04}(maint, region) = \frac{\sum_{p \in P} bs_1(p) \cdot l(p)}{\sum_{p \in P} l(p)} \cdot 100 \%$ kde: $bs_1(p)$ je 1, ak $p.Mu80 < 0,53$; inak 0 $l(p)$ je $p.stanicienieZaciatku - p.stanicienieKonca$ Pre správcu sú záväzné len celoplošné KPI; hodnoty KPI na okresoch sú len doplnkové.
--	---

3.4.10 Indikátor KPI05 – Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska únosnosti (štruktúrnej kapacity)

Kód indikátora:	KPI05
Názov:	Podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska únosnosti (štruktúrnej kapacity)
Definičná množina:	Všetky medzikrižovateľské úseky a lúče zložitých križovatiek mimo mostov.
Kalkulačné dáta:	Nameraná prieťahová krivka, prípadne iné výstupné údaje z TSD. Tieto dáta nie sú zatiaľ dostupné na úrovni cestnej siete. Údaje o konštrukcii vozoviek, minimálne líniová informácia o tuhosti konštrukcie vozovky na úrovni netuhá/polotuhá/tuhá. Tieto dáta nie sú zatiaľ dostupné na úrovni cestnej siete a bude potrebné ich postupne doplniť.
Cieľová hodnota:	< 10 %
Požadovaný trend:	klesajúci
Algoritmus vyhodnotenia:	Bude popísaný po zavedení meraní prieťahovej krivky a príprave TP pre meranie a vyhodnotenie dát zo zariadenia TSD.
Poznámka:	Dočasne nebude vyhodnocovaný.

3.5 Zohľadnenie dopravného zaťaženia

Všetky metriky KPI navrhnutých v predchádzajúcej kapitole sú konštruované ako percentuálny dĺžkovo vážený podiel vozoviek v zlom stave podľa všeobecného vzorca:

$$\frac{\sum_{p \in P} bs(p) \cdot l(p)}{\sum_{p \in P} l(p)} \cdot 100 \%$$

kde:

bs je binárna funkcia, ktorej hodnota na úseku p v zlom stave je 1 a v opačnom prípade 0,

$l(p)$ je dĺžka úseku p ,

P je množina všetkých úsekov, ktoré sa vyhodnocujú v KPI.

Dĺžkové váženie normalizuje rôzne dĺžky úsekov vstupujúce do hodnotenia.

Všetky tieto KPI je možné pretransformovať do podoby, v ktorej okrem dĺžky bude zohľadnené aj dopravné zaťaženie:

$$\frac{\sum_{p \in P} bs(p) \cdot l(p) \cdot di(p)}{\sum_{p \in P} l(p) \cdot di(p)} \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

kde navyše:

$di(p)$ je dopravná intenzita na úseku p vyjadrená ako RPDl.

Takáto metrika vyjadruje percentuálny podiel vozoviek v zlom stave vážený dopravným zaťažením. Metrika a znej odvodené KPI lepšie odrážajú skutočné vplyvy zlých úsekov vozoviek na cestnej sieti na jej používateľov a spoločnosť vo všeobecnosti. Takto upravené KPI momentálne nie je vhodné zaviesť z dôvodov popísaných v kap. 2.9. Jedným zo záverov a navrhovaných ďalších krokov je zavedenie národnej konsolidovanej databázy dopravných intenzít na sieti cestných komunikácií na Slovensku, ktorá by evidovala a udržiavala aktuálne dáta vo frekvencii vhodnej na vyhodnotenie KPI. Akonáhle bude zavedená, všetky KPI01-05 sa môžu previesť na použitie metriky so zohľadnením dopravného zaťaženia podľa vzorca (3.1).

4 Návrh ďalšieho postupu

Ako ďalší postup sa navrhuje:

1.	Pripraviť záväzné TP pre meranie a hodnotenie výkonu na základe KPI01, KPI02, KPI03, KPI04 a KPI05 navrhnutých v tejto RÚ pre diaľnice, rýchlostné cesty a cesty I. triedy.
2.	Implementovať 1. verziu Informačného systému monitorovania výkonu cestných komunikácií pre vyhodnotenie KPI01, KPI02, KPI03 a KPI04 navrhnutých v tejto RÚ.
3.	Na úrovni SSC CDB zaviesť plán meraní nevyhnutných pre hodnotenie KPI01, KPI02 a KPI03 (de facto sa už realizuje).
4.	Na úrovni SSC CDB zaviesť plán meraní nevyhnutných pre hodnotenie KPI04 (merania zariadením Skiddometer BV11 na úrovni cestnej siete).
5.	Zaviesť pravidelné meranie únosnosti vozoviek na úrovni cestnej siete (diaľnice, RC, cesty I. triedy) vysokorýchlostným deflektometrom (TSD) pre hodnotenie KPI05, a to buď zakúpením TSD do vlastníctva SSC alebo subdodávateľským meraním.
6.	Navrhnuť a zaviesť skonsolidovanú databázu aktuálnych dopravných intenzít na sieti CK na Slovensku v gescii SSC alebo ministerstva dopravy a výstavby SR.
7.	Rozšíriť súčasné evidencie IS MCS o atribúty potrebné k vyhodnoteniu niektorých KPI (KPI02 a KPI05 – konštrukcia vozoviek).
8.	Vo forme pokračovania RÚ analyzovať možnosti: • zavedenia KPI pre bezpečnosť cestnej premávky, • zavedenia KPI pre hlukové emisie, • zavedenia kompozitného „manažérskeho“ KPI, • zavedenia KPI na taktickej a operatívnej úrovni hospodárenia s cestnou sieťou, • zavedenia KPI v ďalších oblastiach správy majetku (mosty a ďalšie cestné objekty, cestné vybavenie a pod.), • zohľadnenia hĺbky vyjazdených koľají a pozdĺžneho šmykového trenia do modelu metriky KPI spoločenských nákladov, • konzistencie KPI spoločenských nákladov a KPI03 (konzistencia vzhľadom na parameter MPD).

5 Záver

Systém monitorovania výkonu (SMV) predstavuje esenciálnu zložku hospodárenia s vozovkami a cestnou sieťou založenou na *výkone* definovaného a monitorovaného *klúčovými výkonnostnými indikátormi* (KPI). Tieto indikátory majú povahu kontraktu medzi správcou ako výkonnou zložkou a nadradeným orgánom (ministerstvom dopravy, resp. vlastníkom) ako riadiacou zložkou.

Rozborová úloha nadväzuje na výsledky 1. časti z roku 2019.

Venuje sa dvom veľkým celkom:

- analýze možností zavedenia komplexného klúčového výkonnostného indikátora (KPI), ktorý by reflektoval vplyv technického stavu vozoviek na spoločenské náklady, konkrétne prevádzkové náklady vozidiel, stratové časy vodičov a prepravy nákladu a emisií,
- funkčného a technického návrhu systému monitorovania výkonu a popisu KPI zavedených v 1. verzii tohto systému.

V prvej časti (kap. 2) sa definujú prevádzkové náklady vozidiel, stratové časy a škodové emisné náklady a podrobne sa rozoberajú modely výpočtu týchto parciálnych zložiek celospoločenských nákladov, a to konkrétne v modeli HDM-4, ako najúplnejšieho modelu na ich výpočet v cestnej doprave v súčasnosti. Navrhuje sa ako klúčová metrika *Navýšenie spoločenských nákladov vzhľadom na technický stav* (marginálne náklady) a z nej odvodené KPI *Priemerné navýšenie spoločenských nákladov kvôli technickému stavu vozoviek vážené dopravným zaťažením*. Uvedená metrika je dostatočne citlivá na IRI pri použití modelu HDM-4; na MPD podstatne menej citlivá. Neuvažuje však hĺbku vyjazdených koľají a na MPD sa pozerá len z pohľadu valivého odporu, teda preferujú sa nižšie hodnoty MPD. Istá limitná hodnota MPD je však potrebná pre zaistenie protišmykových vlastností vozoviek, čo je aj predmetom jedného z navrhovaného KPI (KPI03) v SMV popísaného v kapitole 3. Obe KPI súčasne by boli nekonzistentné. Tieto nedostatky je potrebné ešte pred zavedením KPI spoločenských nákladov vyriešiť (návrhy sú uvedené v závere kap. 2 a tiež ako odporúčanie na ďalšie kroky v kap. 4). Ďalšou prekážkou na zavedenie tohto komplexného KPI sú problémy v dostupnosti a aktuálnosti údajov o dopravnej intenzite a skladbe dopravného prúdu na celej hodnotenej cestnej sieti. Nakoľko táto situácia predstavuje limitujúci faktor nielen pri vyhodnotení navrhovaného KPI, ale predstavuje problém aj v iných oblastiach cestného hospodárstva na Slovensku, považujeme za veľmi dôležité túto problematiku začať okamžite riešiť. Po doriešení uvedených faktov sa môže pristúpiť k zavedeniu KPI technického stavu vozovky uvažujúceho spoločenské náklady.

Druhá časť (kap. 3) navrhuje proces rutínnej prevádzky systému monitorovania výkonu správcov ciest (SMV) a pravidelného vyhodnocovania zavedených KPI. Rozoberá procesy zabezpečenia vstupných údajov, ich kontroly, korekcie, vyhodnotenia KPI a ich schválenia. V prípade nesplnenia niektorých KPI správcou sa navrhuje, aby takýto správca písomne vypracoval návrh na nápravné opatrenia s časovým plánom splnenia cieľov nesplneného KPI. V tejto časti je aj popísaný funkčný a technický návrh 1. verzie SMV rozširujúci systém hospodárenia s vozovkami a integrovaný s Informačným systémom Modelu cestnej siete (IS MCS) prevádzkovaného na SSC, ako aj definičné karty navrhovaných KPI hodnotiacich podiel nevyhovujúcich úsekov z hľadiska pozdĺžnej nerovnosti, priečnej nerovnosti a protišmykových vlastností vozoviek.

V kapitole 4 sú prehľadne uvedené všetky potrebné ďalšie kroky tak na zavedenie navrhnutých KPI01-05, ako aj na zavedenie komplexného KPI *Priemerné navýšenie spoločenských nákladov kvôli technickému stavu vozoviek vážené dopravným zaťažením*.

6 Referencie

- [1] O. Svačina, „Strategický reporting stavu vozoviek na úrovni cestnej siete,“ Slovenská správa ciest, Bratislava, 2019.
- [2] C. R. Bennett a I. D. Greenwood, Modelling road user and environmental effects in HDM-4 [Modelovanie účinkov na používateľov ciest a prostredie v HDM-4], 2003.
- [3] Š. Chochol, F. Lehovec, J. Pošvář a L. Rondoš, Cesty a diaľnice I. Projektovanie., Bratislava: Alfa, 1989.
- [4] J. Hermans, „Energy and transportation [Energia a doprava],“ *EPJ Web of Conferences*, 2015.
- [5] OECD, „Road Surface Characteristics: their Interactions and their optimisation [Povrchové vlastnosti ciest: ich interakcie a optimalizácia],“ OECD, Paris, 1984.
- [6] U. Sandberg, „MIRIAM: Rolling Resistance – Basic Information and State-of-the-Art on Measurement methods [MIRIAM: Valivý odpor - základné informácie a špičkové meracie metódy],“ 2011.
- [7] A. Bergiers, L. Goubert, F. D. N. Anfosso-Lédée, J. A. Ejsmont, U. Sandberg a M. Zöller, „MIRIAM: Comparison of Rolling Resistance Measuring Equipment - Pilot Study [MIRIAM: Porovnanie zariadení na meranie valivého odporu - Pilotná štúdia],“ 2011.
- [8] P. Cenek, „Rolling resistance characteristics of New Zealand roads [Charakteristiky valivého odporu na novozélandských cestách],“ Works Central Laboratoris, Lower Hutt, 1994.
- [9] J. J. Taborek, Mechanics of Vehicles [Mechanika vozidiel], Cleveland: Penton Publishing, 1957.
- [10] Michelin, „The tyre - Rolling resistance and fuel savings [Pneumatika - valivý odpor a úspora paliva],“ Société de Technologie Michelin, Clermont-Ferrand, 2003.
- [11] M. Haider a M. Conter, „MIRAVEC: Report on the road infrastructure effects contributing to road vehicle energy consumption and their governing parameters [Report efektov cestnej infraštruktúry prispievajúcich na spotrebu energie vozidla a ich parametre],“ 2012.
- [12] I. D. Greenwood, Calibration of the HDM-4 Congestion Model [Kalibrácia kongesčného modelu HDM-4], Thailand Department of Highways, 1999.
- [13] K. Post, J. Kent, T. J. a N. Carruthers, „Fuel consumption and emission modelling by power demand and a comparison with other models [Spotreba paliva a modelovanie emisií potrebným výkonom a porovnanie s inými modelmi],“ 1984.
- [14] D. Leung a D. Williams, Modelling of motor vehicle fuel consumption and emissions using a power-based model [Modelovanie spotreby paliva motorových vozidiel a emisií modelom založeným na výkone], 2000.
- [15] Ministerstvo dopravy a výstavby SR, „TP 057: Metodika pre používanie HDM-4 v podmienkach SR,“ Ministerstvo dopravy a výstavby SR, Bratislava, 2018.
- [16] E. Benbow, S. Brittain a H. Viner, „MIRAVEC: Deliverable 3.1: Potential for NRAs to provide energy reducing road infrastructure [MIRAVEC: Výstup 3.1: Potenciál pre organizácie správcov ciest poskytovať energiu redukujúcu cestnú infraštruktúru],“ 2013.

- [17] U. Hammarström, J. Eriksson, R. Karlsson a M.-R. Yahya, „Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface conditions. VTI rapport 748A. [Model valivého odporu, model spotreby paliva a potenciál šetrenia dopravných energií pri zmenách povrchu ciest],“ VTI, 2012.
- [18] T. Watanatada a A. M. Dhareashwar, „A Model for Predicting Free-Flow Speeds Based on Probabilistic Limiting Velocity Concepts: Theory and Estimation [Model pre predpoveď voľných rýchlostí založený na pravdepodobnostných konceptoch limitujúcich rýchlostí: Teória a odhady],“ *Transportation Research Record*, 1986.
- [19] EMEP/EEA (European Environment Agency), „Gasoline evaporation from vehicles [Odparovanie benzínu z vozidiel],“ rev. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 [EMEP/EEA inventárna príručka emisií polutantov vzduchu 2019]*, European Environment Agency, 2019.
- [20] M. Kutz, *Handbook of transportation engineering [Príručka dopravného inžinierstva]*, 2004.
- [21] United Nations Environment Programme, „Leaded Petrol Phase-out: Global Status March 2018 [Postupné ukončovania používania olovnatých benzínov - stav k marcu 2018],“ [Online]. Available: <https://bit.ly/2HoMvtj>.
- [22] F. An, M. Barth, J. Norbeck a M. Ross, „Development of Comprehensive Modal Emissions Model Operating Under Hot-Stabilized Conditions [Vývoj komplexného modálneho emisného modelu za horúcich stabilizovaných podmienok],“ *Transportation Research Record* 1587.
- [23] U. Hammerstrom, „Proposal for a Vehicle Exhaust Model in HDM-4 [Návrh výfukového modelu vozidiel v HDM-4],“ rev. *ISOHDM Supplementary Technical Relationships Study Draft Final Report [Návrh finálneho reportu štúdie doplnkových technických vzťahov ISOHDM]*, Borlänge, Swedish National Road Administration Road and Traffic Management Division, 1995.
- [24] Európska komisia, „Handbook on the external costs of transport, version 2019 [Príručka o externých nákladoch dopravy, verzia 2019],“ Directorate-General for Mobility and Transport, Brusel, 2019.
- [25] „ERRATUM for the Handbook on the external costs of transport - Version 2019 [Errata príručky externých nákladov v doprave - verzia 2019]“.
- [26] P. Kennedy, G. J. a I. Moncrief, „Emission Factors for Contaminants Released by Motor Vehicles in New Zealand [Emisné faktory pre kontaminanty uvoľnené motorovými vozidlami na Novom Zélande],“ Ministry of Transport, 2002.
- [27] W. Kam, J. Liacos, J. Schauer, R. Delfino a C. Sioutas, „Size-segregated composition of particulate matter (PM) in major roadways and surface streets [Veľkostne agregované zloženie tuhých látok na veľkých cestách a uliciach],“ *Atmospheric Environment*, zv. 55, pp. 90-97, 2012.
- [28] M. Kleeman, J. Schauer a G. Cass, „Size and Composition Distribution of Fine Particulate Matter Emitted from Motor Vehicles [Veľkostná a kompozičná distribúcia jemných tuhých látok emitovaných z motorových vozidiel],“ *Environmental Science & Technology*.
- [29] Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, TP 070: Prognózovanie výhľadových intenzít na cestnej sieti do roku 2040, Bratislava: Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, 2013.

- [30] T. Henning, C. SB a T. M, „Performance indicator analysis and applying levels of service [Analýza výkonnostných indikátorov a aplikácie úrovni služieb],“ NZ Transport Agency, 2013.
- [31] Waka Kotahi NZ Transport Agency, Monetised benefits and costs manual [Manuál pre monetizované benefity a náklady], Wellington: Waka Kotahi NZ Transport Agency, 2020.
- [32] Object Management Group, „BPMN: Business Process Model and Notation [Model a notácia biznis procesov],“ [Online]. Available: <http://www.bpmn.org/>.
- [33] Object Management Group, „Unified Modeling Language [Unifikovaný modelovací jazyk],“ Needham.
- [34] Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, TP 056: Meranie a hodnotenie nerovnosti vozoviek pomocou zariadenia Profilograph GE, Bratislava: Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, 2012.
- [35] Ministerstvo dopravy pôšt a telekomunikácií, TP 025: Meranie a hodnotenie drsnosti vozoviek pomocou zariadení SKIDDOMETER BV11 a PROFILOGRAPH GE, Bratislava: Ministerstvo dopravy pôšt a telekomunikácií, 2006.
- [36] Ministerstvo dopravy pôšt a telekomunikácií SR, TP 031: Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB, Bratislava: Ministerstvo dopravy pôšt a telekomunikácií SR, 2009.
- [37] „COST 336: Falling Weight Deflectometer, Information Gathering Report, Task Group 2 - FWD at Network Level [COST 336: Rázový deflektometer, pracovná skupina 2: FWD na sieťovej úrovni],“ 1998.
- [38] M. Nasimifar, S. Thyagarajan, S. Chaudhari a N. Sivanewaran, „Pavement Structural Capacity from Traffic Speed Deflectometer for Network Level Pavement Management System Application [Štruktúrna kapacita vozoviek z vysokorýchlostného deflektometra pre aplikáciu v systémoch hospodárenia s vozovkami na sieťovej úrovni],“ SAGE, 2019.
- [39] I. Březina a J. Stryk, „Vysokorýchlostný deflektometer TSD – možnosti jeho využitia pri hodnotení únosnosti vozoviek na úrovni cestnej siete na Slovensku,“ Slovenská správa ciest, Bratislava, 2015.
- [40] M. Elseifi a Z. Zihan, „Assessment of the Traffic Speed Deflectometer in Louisiana for Pavement Structural Evaluation [Posúdenie vysokorýchlostného deflektometra v Louisiane pre štruktúrne hodnotenie vozoviek],“ Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge, 2018.
- [41] K. Maser, P. Schmalzer, W. Shaw a A. Carmichael, „Integration of Traffic Speed Deflectometer and Ground-Penetrating Radar for Network-Level Roadway Structure Evaluation [Integrácia vysokorýchlostného deflektometra a GPR pre štruktúrne hodnotenie ciest na sieťovej úrovni],“.
- [42] Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky, „Celkový počet evidovaných vozidiel v SR,“ [Online]. Available: <https://www.minv.sk/?celkovy-pocet-evidovanych-vozidiel-v-sr>. [Cit. 6.6.2020].
- [43] Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky, „Celkový počet novoevidovaných vozidiel,“ [Online]. Available: <https://www.minv.sk/?pocet-novoevidovanych-vozidiel>. [Cit. 6.6.2020].
- [44] C. Hoban, W. Reilly a R. Archondo-Callao, „Economic Analysis of Road Projects with Congested Traffic [Ekonomická analýza cestných projektov s kongestívnou dopravou],“ World Bank, 1994.

- [45] J. B. Odoki a H. G. Kerali, HDM-4 Volume four: Analytical Framework and Model Descriptions [HDM-4 časť štyri: Analytický rámec a popisy modelov], La Défense cedex: The World Road Association & The World Bank, 2003.
- [46] C. Bennett, *Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4 (presentation) [Modelovanie účinkov na používateľov ciest a prostredie v HDM-4 (prezentácia)]*, Auckland.
- [47] J. Y. Wong, Theory of ground vehicles [Teória pozemných vozidiel], 3 ed., John Wiley & Sons, 2001.
- [48] Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky, „Návrh akčného plánu rozvoja elektromobility v Slovenskej republike“, Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky, Bratislava, 2019.
- [49] P. Boulter, A. Thorpe, R. Harrison a A. Allen, „Road Vehicle Non-Exhaust Particulate Matter - Final Report on Emission Modelling [Nevýfukové tuhé častice z cestných vozidiel - finálny report pre emisné modelovanie]“, TRL limited, Wokingham, 2006.