

Algoritmizácia plánov a modelovanie vývoja stavu vozoviek na úrovni cestnej siete

Rozborová úloha

Ondrej Svačina
Bratislava, X/2019

0 Obsah

0	Obsah	2
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	Matematické modelovanie časového vývoja stavu vozoviek	8
2.1	Úvod	8
2.2	Degradačné činitele a nezávislé premenné modelov	8
2.3	Rodiny vozoviek.....	9
2.4	Deterministické modely	9
2.4.1	Úseková kalibrácia.....	11
2.4.2	Efekty vykonanej ÚOR.....	13
2.4.3	Vývoj empirických modelov	13
2.5	Pravdepodobnostné modely	18
2.5.1	Krivky životnosti (survivor curves)	19
2.5.2	Markovove modely	20
2.5.3	Semi-markovove modely.....	22
2.6	Zahraničné modely	22
2.6.1	Úvod	22
2.6.2	Modely zhrnuté v COST-324.....	22
2.6.3	Írsko.....	25
2.6.4	Illinois, USA	25
2.6.5	Washinton, USA	27
2.6.6	AASHTO návrhový model pre netuhé vozovky	29
2.6.7	Model OPAC (Ontário, Kanada).....	30
2.6.8	Poľsko.....	30
2.6.9	HDM-4	32
3	Algoritmizácia plánov údržby, opráv a rekonštrukcií na sieťovej úrovni	43
3.1	Ciele a hlavné úlohy sieťovej úrovne SHV	43
3.2	Základné pojmy plánovania ÚOR.....	44
3.2.1	Analyzované obdobie.....	44
3.2.2	Homogénny úsek	44
3.2.3	Technológie a katalóg technológií	44
3.2.4	Stratégia (alternatíva) homogénneho úseku.....	45
3.2.5	Priame náklady realizácie ÚOR	45
3.2.6	Prínosy z realizácie ÚOR	45
3.2.7	Zostatková hodnota	47
3.3	Algoritmické prístupy.....	48
3.4	Prioritné rankingové metódy	48
3.5	Viacročné heuristické prioritné metódy.....	51

3.5.1	Analýza marginálnej nákladovej efektivity (MCE)	51
3.5.2	Metóda inkrementálnych prínosov a nákladov (IBC)	53
3.6	Optimalizačné metódy	55
3.7	Príklady prakticky využívaných algoritmov sieťového plánovania ÚOR.....	58
3.7.1	ILLINET (Illinois, USA)	58
3.7.2	GIS-ILLINET 2.0 (Illinois, USA)	58
3.7.3	HDM-4	59
3.7.4	dTIMS	60
3.7.5	Washington, USA.....	60
4	Návrh sieťového plánovania ÚOR v podmienkach SR.....	61
4.1	Súčasný stav	61
4.2	Premenné technické parametre	62
4.2.1	Súhrn	62
4.2.2	Pozdĺžne nerovnosti.....	64
4.2.3	Priečne nerovnosti	64
4.2.4	Mu	64
4.2.5	MPD.....	64
4.2.6	Stav povrchu.....	64
4.2.7	Únosnosť, prevádzková výkonnosť	65
4.2.8	Zaradenie únosnosti do sieťového plánovania SHV	66
4.3	Spoločenské metriky pre kvalitu siete	68
4.3.1	Prevádzkové náklady vozidiel (VOC)	69
4.3.2	Časové náklady (TIMEC).....	70
4.3.3	Emisie (EMMISC)	70
4.3.4	Dopravná nehodovosť (TACCC)	72
4.3.5	Hluk (NOISEC)	72
4.3.6	Úloha premenných technických parametrov pri optimalizácii na spoločenské náklady v modeli HDM-4	72
4.4	Návrh cieľového stavu	73
4.4.1	Základné scenáre	73
4.4.2	Architektúra sieťového plánovania ÚOR	75
4.4.3	Degradačný modul.....	76
4.4.4	Ekonomický modul.....	77
4.4.5	Katalóg technológií	77
4.4.6	Optimalizačné ciele	77
4.4.7	Optimalizačné ohraničenia	78
4.4.8	Optimalizačný modul.....	78
4.4.9	Flexibilita informačného systému pre sieťové plánovanie ÚOR.....	80
5	Návrh ďalšieho postupu a odporúčania.....	81
6	Záver	82
7	Referencie	83

1 Úvod

1.1 Manažérske zhrnutie

Kľúčová úloha hospodárenia s vozovkami je zostaviť plán údržby, opráv a rekonštrukcií (ÚOR) vozoviek. Takýto plán špecifikuje úseky vozoviek spolu s časom (rokom), v ktorom je najvhodnejšie vykonať údržbu, opravu alebo rekonštrukciu.

Správcovia musia udržiavať veľký rozsah ciest v dobrom prevádzkovom stave, pričom na túto činnosť majú vyhradené obmedzené množstvo finančných prostriedkov. Z tohto dôvodu je potrebné hľadať postupy, ktoré správcovi umožnia tieto plány zostaviť, ideálne aj so zohľadnením vopred daného rozpočtu. Tieto postupy musia byť založené na overiteľných základoch vychádzajúcich z poznatkov a praxe hospodárenia s cestnou sieťou a matematicko-informatických princípov. Prehľad algoritmických prístupov pre zostavovanie plánov ÚOR je popísaný v kapitole 3.

Sofistikovanejšie postupy zostavovania plánov ÚOR vyžadujú aj znalosť vývoja stavu vozovky v čase, ktorú využívajú na rozhodovanie o najvhodnejšom čase realizácie ÚOR. Príliš skorý zásah v čase, keď na vozovke mohla byť realizovaná ešte doprava vo vyhovujúcom parametroch, znamená zbytočné a neefektívne míňanie financií. Naopak, príliš neskorý zásah dovoľuje zdegradovať vozovku do momentu, kedy vznikajú vysoké náklady pre spoločnosť (stratové časy vodičov z dôvodu nižších rýchlostí, zvýšené prevádzkové náklady, vyššiu nehodovosť, viac uvoľnených emisií atď.) a kedy už nie je možné na nej vykonať lacnejšie formy rehabilitácie a je nutné pristupovať k drahým opravám a rekonštrukciám. Znalosť o vývoji stave vozovky v čase je možné uplatniť aj pre rozmanité predikcie a what-if analýzy rôznych rozpočtových scenárov plánov ÚOR. Spôsobom modelovania vývoja stavu vozoviek sa zaoberá kapitola 2, v ktorej sú uvedené aj niektoré príklady modelov používaných v zahraničí.

Návrhu aplikácie modelovania časového vývoja stavu vozoviek a zostavovaniu plánov ÚOR na Slovensku je venovaná kapitola 4.

1.2 Cieľ úlohy

Cieľom rozborovej úlohy (RÚ) je pripraviť podklady na rozšírenie funkcií systému hospodárenia s vozovkami v rámci Informačného systému Modelu cestnej siete (IS MCS). Popísať návrh vhodného rozšírenia funkcií pre tvorbu plánu údržby, opráv a rekonštrukcií (ÚOR) vozoviek, ktoré pomôžu správcovi CK pri rozhodovaní o použití finančných prostriedkov. Zostaviť prehľad verejne dostupných a používaných matematických modelov vývoja stavu vozoviek v zahraničí. V súčasnosti implementované funkcie IS MCS je potrebné upresniť a rozšíriť o matematické modelovanie časového vývoja stavu vozoviek a algoritmické postupy pre zostavovanie poradia ÚOR vozoviek cestných komunikácií na Slovensku. V súčasnosti používaný prioritný program je potrebné doplniť o optimalizačný spôsob tvorby plánu ÚOR.

Úloha zahŕňa:

1. prehľad možností matematického modelovania časového vývoja stavu vozoviek (deterministické a stochastické modely),
2. prehľad prístupov pri zostavovaní plánov ÚOR z hľadiska možnosti algoritmizácie (prioritné programy – jednoročná a viacročná rankingová metóda, optimalizačné viacročné programy),
3. návrh aplikácie modelovania vývoja stavu vozoviek a zostavovania plánov ÚOR na Slovensku pre potreby systému hospodárenia s vozovkami (SHV) na úrovni cestnej siete,
4. modelovania vývoja stavu vozoviek 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, Algoritmizácia plánov a modelovanie vývoja stavu vozoviek na úrovni cestnej siete. Bratislava: Slovenská správa ciest, 2019.

1.5 Slovník termínov a skratiek

Termín / skratka	Význam
AADT	Average Annual Daily Traffic – angl. výraz pre RPD1.
AMS	Asset Management System – systém hospodárenia s majetkom
BUNV	bez ujmy na všeobecnosti
CRS	CRS – condition rating survey (prehliadka pre zistenie stavu vozovky) – v tomto zmysle číselný indikátor technického stavu vozovky počítaný z porúch povrchu vozovky získaných vizuálnou prehliadkou. Vyvinutý a používaný je v štáte Illinois, USA.
CSD	Celoštátne sčítanie dopravy
CTEPK	Centrálna technická evidencia pozemných komunikácií, vedie ju SSC ako poverená osoba MDV SR
D/RC/I	Diaľnica alebo rýchlostná cesta alebo cesta I. triedy
E_{ekv}	ekvivalentný modul pružnosti konštrukcie vozovky.
ESAL	Estimated Single-Axle Load – odhadované zaťaženie jednoosovou nápravou; bez bližšieho určenia ide o počet opakovaní zaťaženia americkou návrhovou nápravou 80 kN (18 kpi).
FHWA	Federal Highway Administration – Správa federálnych ciest, USA
FWD	Falling Weight Deflectometer – deflektometer s padajúcim závažím; prístroj na meranie priehybov vozovky pod impulznou záťažou.
IBC	Incremental Benefit-Cost (analysis) – analýza inkrementálnych benefitov a nákladov; jedna z viacročných prioritných metód
IRI	International Roughness Index – medzinárodný index nerovnosti. Technický index pre vyjadrenie miery pozdĺžnej nerovnosti.
IS MCS	Informačný systém Modelu cestnej siete
IS MCS RS	Evidencia referenčnej siete CTEPK v IS MCS
IS MCS NTP	Evidencia nepremenných technických parametrov CTEPK v IS MCS

IS MCS Vozovky DASO	Evidencia dokončených akcií súvislej údržby a opráv aplikácie IS MCS Vozovky
IS MCS Vozovky EKON	Evidencia konštrukcie vozoviek aplikácie IS MCS Vozovky
LPV-3	Longitudinal Profile Variance (rozptyl pozdĺžneho profilu) – technický parameter (metrika) pre vyjadrenie kvality pozdĺžneho profilu (miery pozdĺžnych nerovností). Používa sa napríklad vo Veľkej Británii, Írsku a Belgicku, dnes už väčšinou ako doplnok k IRI.
MCE	Marginal Cost Effectivness (analysis) – analýza marginálnej nákladovej efektivity; jedna z viacročných prioritných metód
MPD	Mean profile texture – priemerná hĺbka profilu; parameter makrotextúry povrchu vozovky, typicky meraný laserovým inerciálnym profilometrom.
MTD	Mean texture depth – priemerná hĺbka textúry; parameter makrotextúry povrchu vozovky, meraný metódou vysypania pieskom.
NDS	Národná diaľničná spoločnosť, a.s.
oprava, O	stavebné práce typicky neinvestičného charakteru, pri ktorých sa odstraňujú poruchy a nedostatky výmenou minimálne obrusnej vrstvy krytu vozovky alebo pokladaním ďalších vrstiev, vrátane zosilňujúcich. Príkladom je výmena krytu vozovky alebo zosilnenie vozovky položením novej vrstvy.
PCI	PCI – pavement condition index (index stavu vozovky) – číselný indikátor technického stavu vozovky počítaný z porúch povrchu vozovky získaných vizuálnou prehliadkou. Vyvinutý americkou armádou a štandardizovaný v ASTM D6433 - 11: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys.
PCR	PCR – pavement condition rating (hodnotenie stavu vozovky) – je číselný indikátor technického stavu vozovky počítaný z porúch povrchu vozovky získaných vizuálnou prehliadkou. Vyvinutý a používaný je v štáte Ohio, USA.
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 $\approx$ 6 894,76 Pa.
rehabilitácia, ÚOR	súhrnné označenie niektorej z metód údržby, opravy alebo rekonštrukcie vozoviek
rekonštrukcia, R	stavebné práce typicky investičného charakteru na vozovke, pri ktorých dochádza k zásahom do nosných častí konštrukcie vozovky. Väčšinou ide o výmenu všetkých nosných vrstiev a stavebnú úpravu podložja.
RPDI	ročný priemer denných intenzít

RSL	Remaining Service/Structural Life – zvyšková prevádzková/štruktúrna životnosť
RUT	rutting – hĺbka vyjazdených koľají (priečných nerovností).
SFC	Sideways force coefficient – koeficient bočného šmykového trenia meraného zariadením SCRIM.
SHV	systém hospodárenia s vozovkami
SSC	Slovenská správa ciest
TNV	počet ťažkých nákladných vozidiel
súvislá údržba, SÚ	stavebná údržba zahŕňajúca údržbové práce v ucelených celkoch. Príkladmi sú rôzne nátery vozoviek.
údržba	súbor prác, ktorými sa pozemné komunikácie udržuujú vo vyhovujúcom technickom a prevádzkovom stave. V kontexte tejto RÚ sa myslí pod údržbou predovšetkým stavebná údržba. Príkladmi sú vysprávkovanie výtlkov a aplikácia náterov.
ÚOR	údržba, oprava a (alebo) rekonštrukcia
YAX	ročný počet náprav všetkých motorových vozidiel [mil./pruh]

2 Matematické modelovanie časového vývoja stavu vozoviek

2.1 Úvod

Modelovanie časového vývoja stavu vozoviek je kľúčovým predpokladom k optimálnemu zostavovaniu plánu údržby, opráv a rekonštrukcií vozoviek. V nasledujúcej kapitole je ukázané, že ciele ekonomickej efektivity v rámci SHV na sieťovej úrovni pri zostavovaní plánov ÚOR je možné naplniť len pri viacročnej analýze, t.j. pri uvažovaní konkrétneho roku, kedy bude naplánovaná niektorá z akcií ÚOR. Niektoré úseky je ekonomické opravovať alebo rekonštruovať ihneď a na niektorých je možné opravu alebo rekonštrukciu oddialiť. Ďalšou typickou riešenou úlohou v cestnom hospodárstve je prognózovať dlhodobu za rôznych podmienok zhoršenie alebo zlepšenie stavu cestnej siete.

Na takéto analýzy potrebujeme vedieť predpovedať, ako sa mení technický stav vozovky v čase. Keďže tieto modely popisujú, ako sa technický stav vozovky zhoršuje, teda degraduje, nazývajú sa aj *degradačné modely* (angl. *deterioration models, performance models, damage models, condition prediction models*).

Technický stav vozovky môžeme vyjadrovať rôznymi veličinami. Veličiny, hodnoty ktorých predpovedáme v degradačnom modeli, budeme nazývať aj *modelované parametre*.

Zostavu modelovaných parametrov, a tým aj degradačných modelov, volíme podľa konkrétneho účelu so zohľadnením možnosti ich merania na dostatočne reprezentatívnych vzorkách úsekov vozoviek.

Modelované parametre môžeme rozdeliť v závislosti od ich povahy na:

- *premenné primárnej odpovede vozovky* – modelujú základné fyzikálne premenné vyjadrujúce odpoveď vozovky na zaťaženie (priehyby, deformácie, napätia, teplotný profil a pod.),
- *funkčné premenné* – modelujú parametre prevádzkovej spôsobilosti vozoviek, a to vrátane kompozitných indexov.

Z hľadiska matematickej typológie degradačné modely delíme na:

- *deterministické* – matematické funkcie, ktoré predpovedajú hodnotu modelovaného parametra alebo
- *stochastické (pravdepodobnostné)* – predpovedajúce distribúciu hodnôt modelovaného parametra (náhodnej premennej).

2.2 Degradáčny činitele a nezávislé premenné modelov

Pri vývoji degradačných modelov je potrebné uvážiť jednotlivé faktory, ktoré spôsobujú degradáciu vozovky.

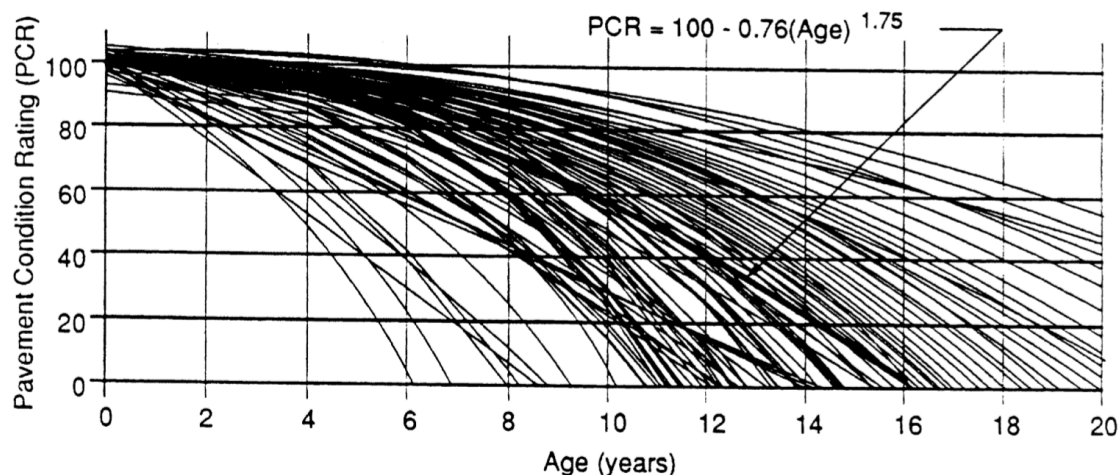
Každý takýto faktor môže vstupovať do degradačného modelu:

1. priamo – ako nezávislá premenná,
2. nepriamo – ako kľúč faktorovej triedy, pre hodnotu každej sa vytvorí samostatný degradačný podmodel. Faktorová trieda tvorí tzv. rodinu vozoviek.

Vplyv rôznych činiteľov dobre ilustruje nasledovný obrázok, na ktorom sú zachytené pozorované priebehy vývoja hodnotenia stavu vozovky (PCR¹) v intervale 100 (výborný

¹ PCR – pavement condition rating (hodnotenie stavu vozovky) – je indikátor technického stavu vozovky počítaný z porúch povrchu vozovky získaných vizuálnou prehliadkou. Vyvinutý a používaný je v štáte Ohio, USA.

stav) pod 0 (vozovka na konci životnosti) v závislosti od jej veku. Model zohľadňujúci len jedinú nezávislú premennú (vek) produkuje v praxi na rozmanitých vozovkách širokú variabilitu kriviek:



Obrázok 1 Variabilita modelu funkcie PCR od veku vozovky (prebraté z interných materiálov FHWA [1]).

2.3 Rodiny vozoviek

Koncept *rodín vozoviek* (angl. *pavement families*) sa začal používať niekedy od polovice 80. rokov na základe prác M. Shahina [2], [3].

Rodina vozoviek je skupina vozoviek vykazujúca v degradačnom modeli rovnaké alebo veľmi podobné degradačné vzory. Rodina vozoviek je určená vybranými atribútmi, ktoré nazývame *charakteristické atribúty*. Tieto atribúty môžu mať kategorickú alebo intervalovú povahu. Charakteristické atribúty tak priradujú každý úsek vozovky jednej rodine vozoviek a tvoria tak faktorový rozklad.

Typickými v praxi používanými charakteristickými atribútmi bývajú:

- typ konštrukcie vozovky,
- klimatické podmienky,
- dopravné zaťaženie.

Prvé dva príklady sú kategorické atribúty a posledný je intervalový atribút (často trieda dopravného zaťaženia).

Techniku rodín vozoviek môžeme využiť veľmi prakticky pre redukciu počtu nezávislých premenných degradačných modelov. Nezávislá premenná sa nahradí zodpovedajúcim charakteristickým atribútom a pre každú rodinu vozoviek sa tak vytvorí zvlášť degradačný model. Vychádza sa z predpokladu, že modely o menšom počte nezávislých premenných sú jednoduchšie na vývoj.

Konverzia nezávislej premennej na charakteristický atribút rodiny vozoviek navyše zvyšuje stabilitu modelu, pretože charakteristické číselné atribúty nevstupujú do modelu priamo svojimi hodnotami, ale cez intervalovú klasifikáciu.

2.4 Deterministické modely

Deterministický degradačný model popisuje degradáciu vozovky ako **matematickú funkciu vyjadrujúcu jednoznačný vzťah medzi nezávislými premennými a modelovaným parametrom**.

Keďže prakticky nie je možné zohľadniť dokonale všetky degradačné činitele, či už ako nezávislé premenné alebo charakteristické atribúty rodín vozoviek, je zrejmé, že výstup

(predikcia) deterministického modelu pre daný úsek vozovky predstavuje vo všeobecnosti priemernú hodnotu alebo nejakým spôsobom reprezentatívnu hodnotu.

Podľa počtu nezávislých premenných rozdeľujeme deterministické modely na:

- **jednparametrové** – používajú jedinou nezávislú premennú, typicky vek vozovky ako počet rokov od stavby alebo poslednej rehabilitácie alebo počet opakovaní zaťaženia návrhovou nápravou. Ostatné degradačné činitele modelujeme technikou rodín vozoviek,
- **viacparametrové** – používajú viac ako jednu nezávislú premennú. Môžu tiež použiť pre zohľadnenie ostatných degradačných činiteľov techniku rodín vozoviek.

Príkladom jednparametrovej degradačnej funkcie môže byť:

$$IRI = e^{a+b.AGE}$$

a príkladom viacparametrovej degradačnej funkcie:

$$CI = a + b.věk + c.RPDI + d.SN$$

kde:

<i>CI</i>	je modelovaný index stavu vozovky,
<i>a, b, c, d</i>	sú regresné parametre,
<i>vek</i>	je počet rokov od novostavby alebo rekonštrukcie vozovky,
<i>RPDI</i>	je ročný priemer denných intenzít,
<i>SN</i>	je štruktúrne číslo vozovky vypočítané z meraní FWD.

Degradačná funkcia má väčšinou formu:

- **absolútnej rovnice** – vzorec uvádzajúci explicitný vzťah medzi výrazom s nezávislou premennou na jednej strane a modelovaným parametrom na druhej strane; napr. $IRI = e^{a+b.AGE}$.
- **rekurentnej rovnice** – vzorec uvádzajúci vzťah medzi hodnotou modelovaného parametra na jednej strane a výrazom s predchádzajúcou hodnotou modelovaného parametra v diskretizovanom časovom rade a potenciálne inými nezávislými premennými. Napr.: $IRI_{t+1} = a + b.IRI_t$.

Deterministické degradačné modely môžeme rozdeliť podľa spôsobu ich vývoja na [4]:

- **mechanistické** – odvodené z analytických alebo numerických fyzikálnych modelov (napr. teórie elastických vrstiev alebo metódou konečných prvkov) a kalibrované na lokálne podmienky,
- **empirické** – odvodené čisto štatistickou analýzou (typicky regresiou alebo najnovšie aj metódami strojového učenia sa) z údajov meraní,
- **mechanisticko-empirické** – kombinácia oboch, kde základné vzťahy odvodené teoreticky sú rozšírené štatistickými metódami z údajov meraní.

Primárna odpoveď vozovky môže byť modelovaná principiálne mechanisticky, mechanisticko-empiricky aj empiricky. Funkčné parametre bývajú buď čisto empirické alebo mechanisticko-empirické (zatiaľ nepoznáme žiadny uspokojivý čisto mechanistický model týchto parametrov). Mechanisticko-empirické funkčné modely sú väčšinou založené na mechanistickom modelovaní primárnej odpovede a empirickým vzťahom medzi touto odozvou a parametrami prevádzkovej spôsobilosti.

Zvláštnu kategóriu medzi empirickým a mechanisticko-empirickým tvorí degradačný model HDM-4, v ktorom sa využili pokročilé štatistické techniky a veľké množstvo terénnych dát z meraní na odhadnutie degradačných modelov, ktorých funkcionálne

formy a premenné boli štruktúrované na mechanistických princípoch. Autori tento prístup nazývajú štruktúrovano-empirický. [5]

2.4.1 Úseková kalibrácia

Ako bolo spomenuté vyššie, deterministický degradačný model predpovedá *priemernú (reprezentatívnu) hodnotu* modelovaného parametra.

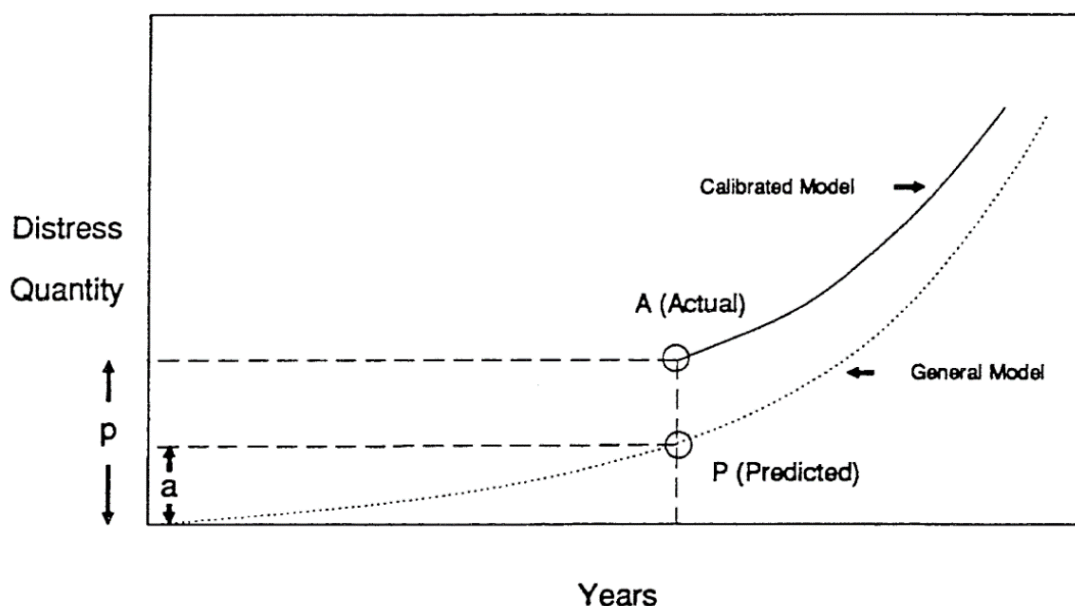
Pri predpovedaní budúceho stavu na konkrétnom úseku môžeme niekedy zlepšiť presnosť predikcie využitím historických a aktuálnych hodnôt modelovaného parametra z meraní.

Používajú sa dve techniky: *posúvanie krivky* a *backcasting*. Upravenému degradačnému modelu týmito technikami hovoríme aj *úsekovo-kalibrovaný* alebo *lokálne-kalibrovaný* model.

Zvláštna technika, ktorú je možné považovať za úsekovo špecifický model, je priama regresia z meraných údajov konkrétneho úseku, pri ktorej sa dajú aj kombinovať všeobecné krivky (pozri napríklad popis modelu použitého v štáte Washington, USA v kap. 2.6.5).

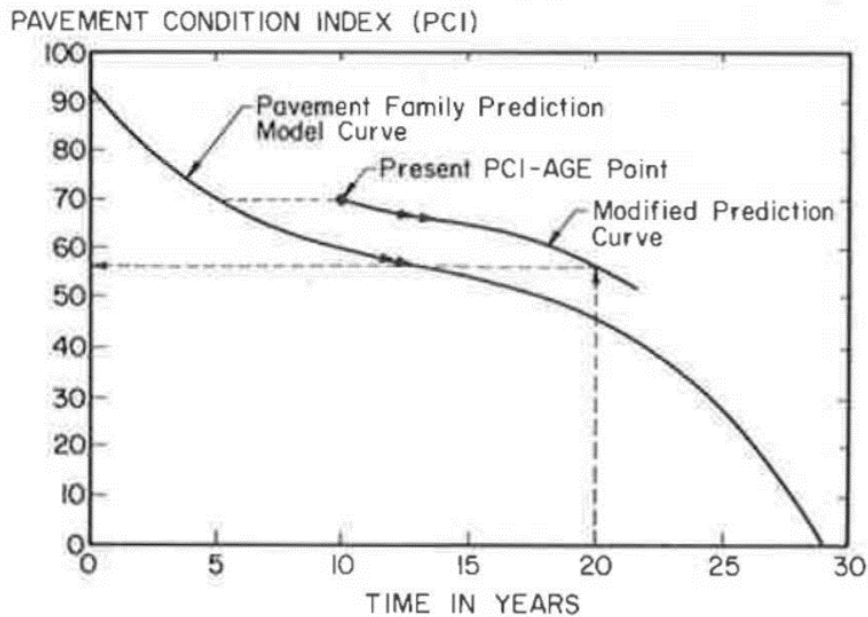
Pri **posúvaní krivky** (angl. *curve shifting*) sa degradačná krivka posunie na vertikálnej osi (hore alebo dole) tak, aby sa kryla s bodom poslednej známej hodnoty.

Princíp znázorňuje obrázok prebratý z [6]:



Obrázok 2 Všeobecná ilustrácia princípu posúvania kriviek

Nasledujúci obrázok prebratý z [2] znázorňuje ilustratívny príklad na degradačnej funkcii PCI. V 10. roku by mal mať teoretický úsek hodnotu PCI podľa krivky 60. Po vykonaní prehliadky však bola priradená hodnota PCI 70. Degradačná krivka sa tak posunie o 10 bodov hore. Z takto posunutej krivky sa urobí predikcia – napríklad v roku 20 sa očakáva hodnota PCI 57.



Obrázok 3 Ilustratívny príklad aplikácie techniky posúvania kriviek

Pri tomto prístupe sa predpokladá, že budúci stav *de facto* závisí len od súčasného stavu a nie explicitne od času. Časový vzťah sa používa len na kalibráciu degradačnej krivky. Je zrejmé, že to nie je úplne korektný predpoklad, avšak pre predpovedanie stavu v krátkej budúcnosti môžeme dostať uspokojivé výsledky.

Pri posúvaní kriviek sa vychádza z bodu aktuálnej hodnoty nezávislej premennej – teda väčšinou času alebo počtu doteraz realizovaných zaťažení návrhovými nápravami. Táto informácia však vo väčšine prípadov nemusí byť spoľahlivo zistiteľná na vyšetrovanom úseku.

Druhá technika sa nazýva **backcasting**. Deterministickú rovnicu absolútneho modelu sa snaží transformovať spätným dopočítaním nezávislých premenných z aktuálne nameraných hodnôt závislej modelovanej premennej a transformáciou na rekurentný vzťah. Pri viacparametrových modeloch volíme na spätný dopočet jednu, ktorou je typicky čas alebo počet opakovaných zaťažení návrhovými nápravami.

Na rozdiel od vyššie popísaného posúvania kriviek tento spôsob nepredpokladá, že aktuálnu hodnotu nezávislej premennej (napr. času) na úseku poznáme spoľahlivo.

Príkladom je degradačný model indexu CRS (condition rating survey) z Illinois, USA. Absolútny model bol nájdený empiricky vo forme [7]:

$$CRS = 9 - 2 \cdot a \cdot THICK^b \cdot AGE^c \cdot CESAL^d$$

kde:

THICK je hrúbka CB dosky, nového asfaltového krytu (nad CB vozovkou) alebo hrúbka asfaltovej vozovky,

AGE je počet rokov od poslednej rekonštrukcie alebo nového krytu,

CESAL je akumulovaný počet ESAL od poslednej rekonštrukcie alebo nového krytu,

a, b, c, d sú parametre podľa typu konštrukcie vozovky.

Úsekovou kalibráciou backcastingom na dáta konkrétneho úseku dostaneme matematickými úpravami formu:

$$CRS_{future} = 9 - 2 \cdot a \cdot THICK^b \cdot (C_1 + \Delta YEAR)^c \cdot (C_2 + \Delta CESAL)^d$$

$$C_1 = \left(\frac{9 - CRS}{2 \cdot a \cdot THICK^b \cdot ESALPYR^d} \right)^{\frac{1}{c+d}}$$

$$C_2 = C_1 \cdot ESALPYR$$

kde

CRS je aktuálna hodnota CRS,

$\Delta YEAR$ je počet rokov predikcie do budúcnosti,

$\Delta CESAL$ je prírastok opakovaného zaťaženia ESAL do roku predikcie,

$ESALPYR$ je aktuálny ročný počet ESAL.

Backcastingovú rovnicu je ťažšie odvodiť ako aplikovať posúvanie kriviek, ale nie je potrebné poznať aktuálne hodnoty všetkých nezávislých premenných.

2.4.2 Efekty vykonanej ÚOR

Realizované stavebné zásahy do vozovky (ÚOR) typicky zmenia jej degradačný priebeh. Tieto prípady sa riešia dvomi spôsobmi:

1. zahrnutím efektov ÚOR do modelu ako nezávislú premennú,
2. výmenou degradačného modelu na danom úseku vozovky.

Efekty ÚOR ako nezávislé premenné môžeme do modelu vložiť ako rôzne retardačné faktory, koeficient upravujúce strmosti kriviek a pod.

Na výmenu degradačného modelu po aplikácii ÚOR sa dá elegantne aplikovať technika rodín vozoviek. Postačuje zahrnúť realizované ÚOR do charakteristického atribútu konštrukcie vozovky.

Príkladom je model HDM-4, ktorý využíva obe techniky.

2.4.3 Vývoj empirických modelov

Mechanistické a čiastočne aj mechanisticko-empirické modely typicky vyžadujú dáta, ktoré v súčasnosti nie je jednoduché zisťovať na sieťovej úrovni. Predpokladá sa, že aspoň prvé využiteľné degradačné modely na Slovensku budú vytvorené ako empirické modely. Zvyšok tejto kapitoly sa preto zaoberá metódami vývoja takýchto modelov.

2.4.3.1 Regresia

Regresia (regresná analýza) patrí k základným štatistickým nástrojom vývoja empirických modelov. Cieľom regresie je nájsť štatisticky významný vzťah medzi závislou premennou, ktorou je modelovaný degradačný parameter, a nezávislou premennou alebo premennými (tzv. explanatórnymi premennými alebo prediktormi).

Z údajov meraní máme k dispozícii dátový súbor $\{(X_i, Y_i)\}$, kde X_i je hodnota prediktora (napr. realizované dopravné zaťaženie alebo vek vozovky) a Y_i je hodnota závislej premennej (degradačného parametra). Obe sa dajú popísať nejakými náhodnými premennými X a Y , medzi ktorými predpokladáme nejaký vzťah, ktorého formu nepoznáme. Snažíme sa ho preto nahradiť aspoň približným vzťahom f_r :

$$Y = f_r(X, B) + \epsilon$$

kde:

B je vektor regresných parametrov (ktoré treba odhadnúť spolu s funkciou f_r),

ϵ je náhodná premenná vyjadrujúca predikčnú chybu

Predikčnú chybu sa snažíme minimalizovať tak, aby vyjadrovala už len náhodné okolnosti nepredikovateľné žiadnym iným modelom z daného súboru meraní.

Regresný vzťah f_r určíme odhadom podľa skúseností alebo skúsime rôzne vzťahy, napríklad lineárny, kvadratický, logaritmický a pod.

Po odhade regresného vzťahu f_r potom hľadáme regresné parametre typicky metódou najmenších štvorcov, teda optimalizačnou úlohou:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - f_r(X_i, B))^2 \rightarrow \min$$

Úspešnosť regresie meriame väčšinou *koeficientom determinácie* R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - f_r(X_i, B))^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

kde $\bar{Y}$ je stredná hodnota zo súboru meraní.

Regresia je stále najčastejší spôsob vývoja deterministických degradačných modelov. Z prechádzajúceho popisu vyplýva úloha odhadnúť regresný vzťah f_r . Možné sú dva prístupy:

- využiť niektorú zo štandardizovaných kriviek,
- využiť všeobecné vzťahy (polynomiálna regresia, logaritmická, exponenciálna a pod.).

Štandardizované krivky boli vyvinuté v predchádzajúcom výskume a rôznych testoch. Môžu vychádzať aj zo skúsenosti s degradáciami v iných oblastiach. Pokiaľ modelovaná cestná sieť spĺňa podobné podmienky, ako úseky na ktorých boli štandardizované krivky odvodené, je možné ich použiť. Patria sem výkonnostná rovnica AASHO a sigmoidné modely; obe popíšeme ďalej. Na konci kapitoly je popísaná technika všeobecnej polynomiálnej regresie.

2.4.3.2 Výkonnostná rovnica AASHO

Koncom 50. rokov minulého storočia sa v USA konal slávny AASHO Road Test. Počas dvoch rokov (1958-1960) sa na testovacej dráhe z asfaltovej aj betónovej vozovky konalo veľké akceleračné záťažové testovanie za neustáleho sledovania a vyhodnocovania stavu vozoviek. Jedným z hlavných cieľov bolo nájsť vzťah medzi prevádzkovou funkčnosťou (*serviceability*) a merateľnými parametrami vozoviek a následne odvodiť vzťahy pre ich degradáciu.

Nakoniec sa ustálil vzťah [8]:

$$p = c_0 - (c_0 - c_1) \left(\frac{W}{\rho} \right)^\beta$$

kde:

- p je predpovedaná trendová hodnota prevádzkovej funkčnosti,
 c_0 je počiatočná hodnota prevádzkovej funkčnosti (4,2 pre asfaltové vozovky),
 c_1 je úroveň prevádzkovej funkčnosti na konci testu, resp. na konci životnosti (2,7 pre asfaltové vozovky),
 W je celkové nápravové zaťaženie (pôvodne v kipoch, 1 kip $\approx$ 4,49 kN),
 ρ, β sú funkcie návrhových parametrov vozovky a zaťaženia a súčasne kalibračné parametre.

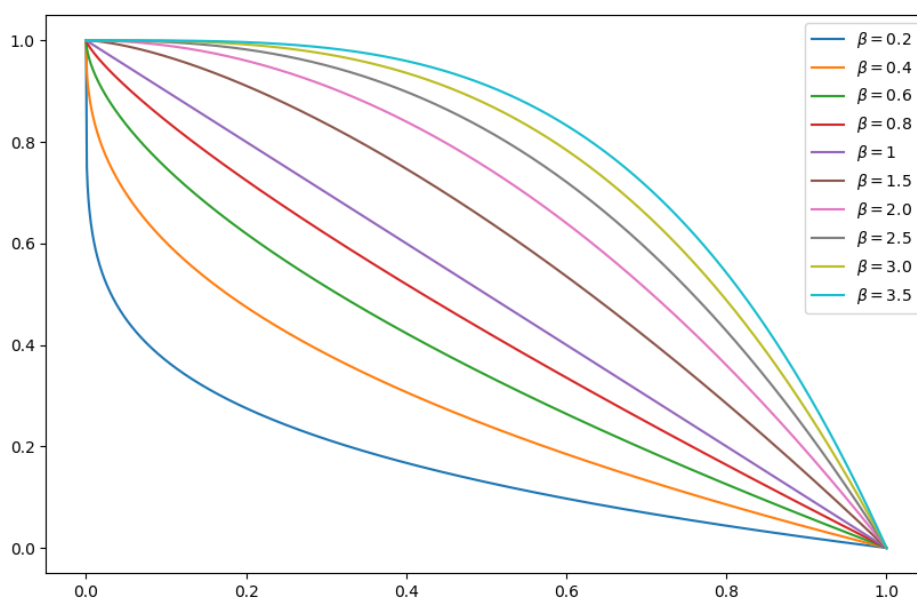
Hoci bola táto rovnica navrhnutá striktne pre index prevádzkovej funkčnosti AASHO (PSI), začala sa využívať pre modelovanie aj iných parametrov (niekedy s diskutabilným odôvodnením), a to najčastejšie v tvare, kde závislá premenná je škálovaná do intervalu $<0, 1>$ (teda $c_0 = 1, c_1 = 0$) [9] [4]:

$$g = 1 - \left(\frac{W}{\rho} \right)^\beta$$

Nezávislá premenná W bola zovšeobecnená okrem celkového nápravového zaťaženia aj na počet klimatických cyklov alebo relatívny čas (vek vozovky). Parametre ρ a β sa hľadali regresiou.

Rovnica produkuje jednoduché krivky, ktoré sú pre rôzne hodnoty parametra β znázornené na obrázku nižšie v nezávislej premennej škálovanej pre jednoduchosť taktiež do intervalu $<0, 1>$ ($\rho = 1$).

Treba pripomenúť, že rovnica bola vyvinutá koncom 50. rokov minulého storočia a pre funkčný index PSI. Odvtedy bolo získané množstvo ďalších poznatkov, zozbierané množstvo ďalších dát z meraní a mnohonásobne sa aj zvýšil výpočtový výkon počítačov schopných vykonávať zložité regresné analýzy.



Obrázok 4 Krivky výkonnostnej rovnice AASHO pre rôzne hodnoty parametra β pri $\rho = 1$.

2.4.3.3 Sigmoidné modely

Analýzy meraní z ďalších rokov ukázali, že lepšiu aproximáciu degradácie väčšiny parametrov vozoviek poskytujú modely na báze logistických kriviek.

Vo všeobecnosti sa používa rovnica [9]:

$$P = P_0 - (P_0 - P_f) \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{W}\right)^\beta}$$

kde opätovne:

P_0 je počiatočná hodnota modelovaného parametra,

P_f je terminálna hodnota parametra,

W je nezávislá premenná (dopravné zaťaženie, vek vozovky),

ρ, β sú parametre modelu.

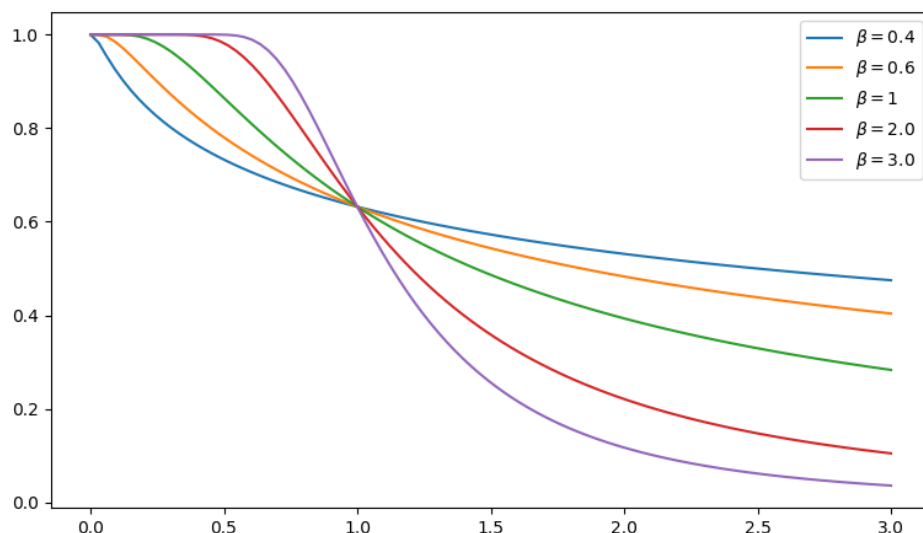
P_0 je dopredu známa hodnota, avšak hodnota P_f nemusí a môže sa hľadať rovnako ako hodnoty parametrov ρ a β v regresii.

Model produkuje typické krivky tvaru „S“ (sigmoidy), ktoré sa asymptoticky približujú k hodnote P_f .

Podobne ako v prípade výkonnostnej rovnice AASHO sa používa aj relativizovaná obmena v modelovanom parametri v intervale $<0, 1>$ položením $P_0 = 1$ a $P_f = 0$:

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{\rho}{W}\right)^\beta}$$

ktorej krivka pre rôzne hodnoty parametra β a $\rho = 1$ je na nasledujúcom obrázku:



Obrázok 5 Sigmoidná degradačná krivka pre rôzne hodnoty parametra β .

V praxi sa používa aj obmena základnej rovnice získaná substitúciou [10]:

$$P = P_0 - e^{(a-b \cdot c^t)}$$

kde:

P_0 je počiatočná hodnota modelovaného parametra,

$$t = \log_e \frac{1}{w}.$$

a, b, c sú parametre modelu.

Substitúcia $a = \log_e(P_0 - P_f)$, $b = \rho^\beta$, $c = e^\beta$ uľahčuje hľadanie parametrov modelu.

Pre predikciu vývoja jednotlivých porúch môžeme zasa použiť takúto obmenu:

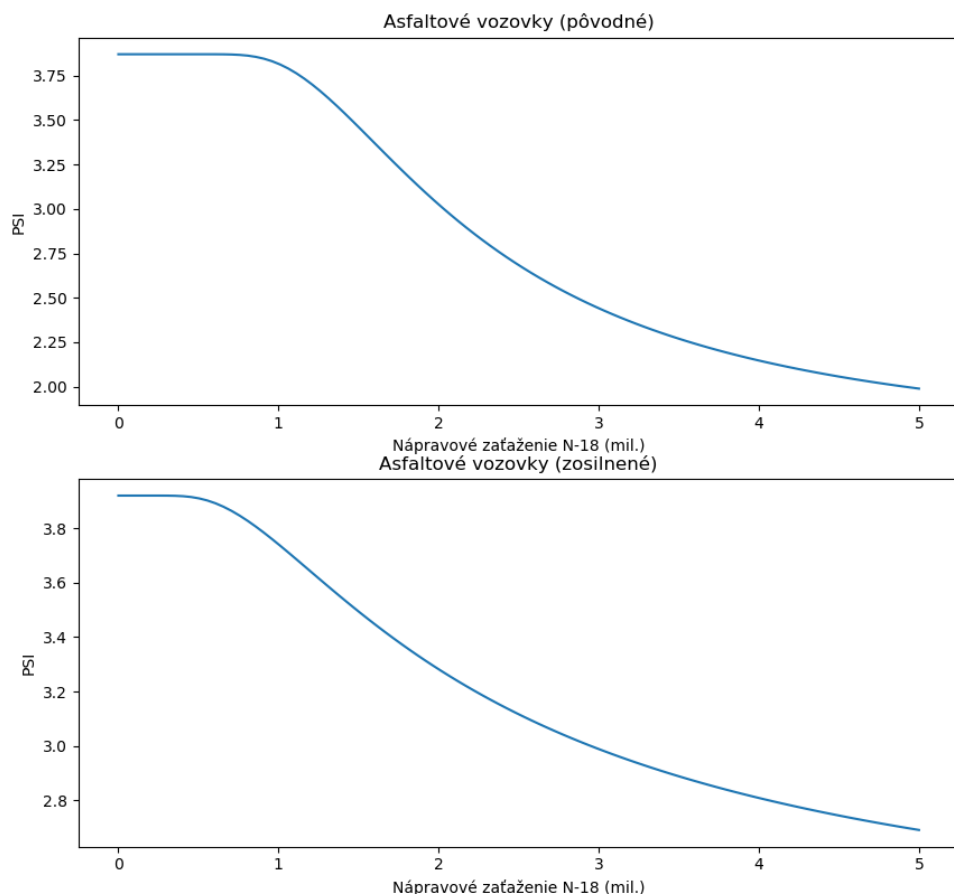
$$D = e^{-\left(\frac{k}{w}\right)^b}$$

kde:

D je plošný podiel výskytu poruchy (od 0 do 1, kde 1 reprezentuje 100 % plochy),

k, b sú parametre modelu; okrem iného závisia od modelovaného typu poruchy a modelovanej triedy závažnosti.

Príklady grafického znázornenia konkrétnych kriviek nájdených v Texase, USA, ilustruje nasledovný obrázok:



Obrázok 6 Príklady nájdených sigmoidných degradačných kriviek indexu prevádzkovej funkčnosti PSI v Texase podľa [9].

2.4.3.4 Polynomiálna regresná analýza

Polynomiálna regresná analýza predpisuje všeobecný regresný vzťah vo forme polynómu o nezávislej premennej. Ukazuje sa, že pre väčšinu modelovaných parametrov postačuje v praxi uvažovať polynómy najviac štvrtého stupňa:

$$D(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$$

kde:

$D(x)$ je modelovaná degradačná funkcia,
 x je nezávislá premenná (čas alebo celkové dopravné zaťaženie),
 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 sú regresné konštanty.

Väčšinou však nie je možné priamo aplikovať regresnú analýzu v tomto tvare, nakoľko pre polynómy vyšších stupňoch zvykne produkovať nemonotónne krivky. Krivka, ktorá nie je nerastúca, nezodpovedá realite, keďže vozovkám sa postupom času len zhoršuje technický stav, nie naopak. Musíme preto použiť tzv. *ohraničenú regresnú analýzu*, pri ktorej na výslednú regresnú krivku kladieme dodatočnú podmienku nekladnej prvej derivácie:

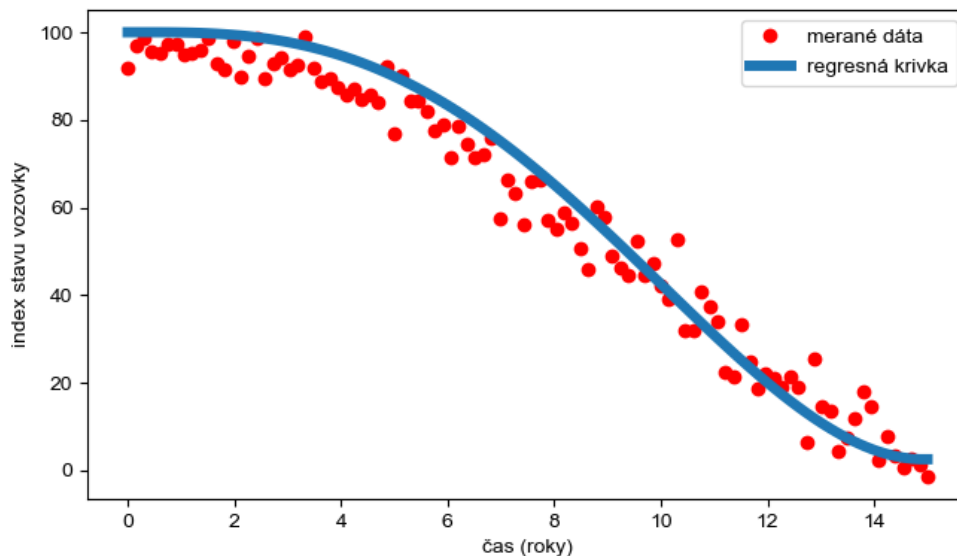
$$D'(x) \leq 0$$

teda pri polynomiálnej regresnej analýze 4. stupňa:

$$a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + 4a_4x^3 \leq 0$$

Väčšinou požadujeme aj, aby počiatočná hodnota modelovaného parametra na začiatku mala pevnú hodnotu zodpovedajúcu novej vozovke.

Nasledujúci obrázok ukazuje príklad výsledku polynomiálnej regresnej analýzy 4. stupňa s nezáporne ohraničenou 1. deriváciou a podmienkou $D(0) = 100$ pre odvodenie degradačnej funkcie indexu stavu vozovky podľa jej veku pre istú rodinu vozoviek z nameraných údajov:



Obrázok 7 Príklad polynomiálnej regresie 4. stupňa pri odvodzovaní degradačnej funkcie indexu stavu vozovky podľa veku vozovky z nameraných dát

Výsledkom regresie sú hodnoty regresných parametrov; v príklade na obrázku:

$$ISV(x) = 0,006x^4 - 0,1286x^3 + 0,0853x^2 - 0,01430x + 100,0371$$

Po vytvorení degradačného modelu sa musí vykonať štatistická skúška, ktorou by sa malo preukázať, že testovacie dáta už významne nekorelujú so žiadnym iným atribútom okrem nezávislej premennej a charakteristických atribútov rodín vozoviek.

2.5 Pravdepodobnostné modely

Deterministické modely budú v praxi vykazovať vždy istú nepresnosť, pretože:

1. existuje príliš veľa faktorov ovplyvňujúcich degradáciu vozoviek, ktoré modely nemusia zohľadňovať,
2. cesty vykazujú isté variácie aj v rámci rodiny vozoviek v nezávislých premenných (dopravné zaťaženie, klimatické pomery),
3. meracie zariadenie majú inherentnú nepresnosť a z dôvodu poruchy alebo zlej kalibrácie môžu mať prítomnú aj dodatočnú nepresnosť,
4. následné spracovanie dát (regresia, priemerovanie) vnáša ďalší druh nepresnosti.

Pravdepodobnostné (stochastické) modely tieto chyby priznávajú a poskytujú nástroje na ich vyjadrenie. V tomto kontexte je vhodné sa na deterministické modely znova pozeráť ako na modely, ktoré predpovedajú *priemernú* degradáciu pre istú skupinu vozoviek.

V pravdepodobnostných modeloch vystupujú modelované parametre vo forme náhodných premenných. Cieľom nie je predpovedať jednu konkrétnu hodnotu, ale pravdepodobnostnú distribúciu a z nej niektoré vlastnosti (stredná hodnota, smerodajná odchýlka a pod.).

Tri v praxi používané modely – krivky životnosti, Markovove modely a semi-markovove modely – sú popísané ďalej.

Pravdepodobnostné modely môžeme vyvinúť aj z deterministických konverziou, pri ktorej uvažujeme nezávislé premenné deterministickej funkcie ako náhodné premenné [11].

2.5.1 Krivky životnosti (survivor curves)

Krivky životnosti sa využívajú v priemysle a správe infraštruktúry na analýzu životnosti rôznych strojov a zariadení. Prvé teoretické práce boli publikované už začiatkom minulého storočia. Patria preto aj k prvým degradačným modelom v systémoch hospodárenia s vozovkami, ktoré boli vôbec vyvinuté.

Základná krivka modeluje podiel vozoviek, ktoré nepotrebujú závažnejšiu opravu alebo rekonštrukciu (t.j. sú ešte pred hranicou životnosti), v závislosti od času. Nezávislá časová premenná je buď priamo počet rokov od stavby alebo poslednej rekonštrukcie alebo reprezentuje dopravné zaťaženie. Závislá premenná je typicky vyjadrená dĺžkovo, teda podielom metrov. Povedané aj inak, ukazuje pravdepodobnosť (závislá premenná), že vozovka s istým vekom alebo po prekonaní istého zaťaženia (nezávislá premenná), nie je na hranici životnosti. Z tohto dôvodu sa nazývajú aj *spoľahlivostné krivky*.

Ak takúto krivku prežitia označíme ako $s(x)$, potom funkcia

$$F(x) = 1 - s(x)$$

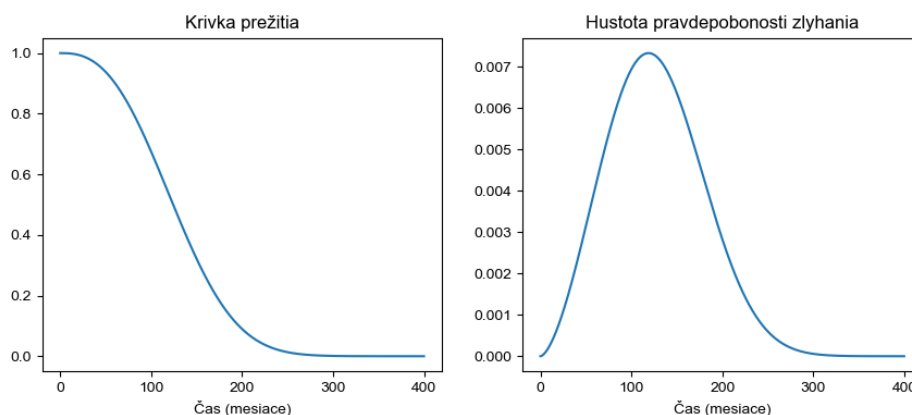
z definície bude vyjadrovať podiel vozoviek, ktoré do času x sú už za hranicou životnosti. Funkcia $F(x)$ je potom distribučná funkcia nejakej náhodnej premennej a jej prvá derivácia je funkcia hustoty pravdepodobnosti zlyhania (teda, že vozovka je za hranicou životnosti).

Životnosť vozovky a teda aj hranica životnosti, je daná kritickou hodnotou zvoleného parametra technického stavu vozovky.

Základné krivky životnosti sa vytvárajú štatistickou analýzou prežitia rodiny vozoviek. Najskôr vzniknú parciálne krivky životnosti, nakoľko len málokedy máme k dispozícii dostatok dát na presné modelovanie krivky počas celej životnosti rodiny vozoviek. Tieto parciálne krivky preto podstupujú následne mapovanie na typizované krivky (*fitting*) za účelom intrapolácie, extrapolácie, vyhladenia a výpočtu priemernej životnosti, pravdepodobnej životnosti, očakávaného veku dožitia a rozptylu mortality. Veľmi často používanými typizovanými krivkami sú *iowské krivky* (empiricky odvodené), *h-krivky* (orezané krivky normálnej distribúcie smerom k ľavému alebo pravému chvostu) a krivky odvodené z *Weibullovhovho rozdelenia*. Všetky produkujú typické krivky v tvare „S“.

Obrázok 8 znázorňuje príklad krivky prežitia a prislúchajúcej funkcii hustoty pravdepodobnosti zlyhania pre vývoj priečných nerovností v závislosti od počtu mesiacov od výstavby alebo rekonštrukcie na vozovkách s asfaltom vyrábaným za horúca (HMA). Krivka sleduje Weibullove rozdelenie s parametrami $\lambda = \frac{1}{0,007}$ a $k = 2,617$ a bola pripravená v rámci výskumu na Texaskom dopravnom inštitúte v roku 1984 [12].

Pre vývoj kriviek nie je potrebné mať také veľké množstvo údajov ako pre iné typy modelov. Zvyčajne pre prvú aproximáciu postačujú merania na 4-5 reprezentatívnych úsekoch pre každú rodinu vozoviek.



Obrázok 8 Krivka prežitia a hustota pravdepodobnosti zlyhania pre vývoj priemernej nerovnosti na asfaltových vozovkách typu HMA

2.5.2 Markovove modely

Základy modelovania degradácií vozoviek cez Markovove modely boli položené už niekedy v 70. rokoch minulého storočia. V súčasnosti sa hojne využívajú pri modelovaní degradácií mostov a mostných komponentov.

V Markovových modeloch uvažujeme s konečnou množinou stavov, ktorá vyjadruje aktuálny technický stav vozovky. Spojité premenné je potrebné najskôr diskretizovať, napríklad zatriedením do klasifikačných stupňov.

Použitie týchto modelov je založené na dvoch predpokladoch:

1. pravdepodobnosť, že vozovka prejde z jedného stavu do druhého, závisí jedine na aktuálnom stave (proces má teda tzv. markovovskú vlastnosť),
2. pravdepodobnosť prechodu medzi stavmi je v čase nemenná (teda prechodový proces je stacionárny).

Je potrebné poznamenať, že predpoklad č. 2 pri modelovaní degradácii vozoviek neplatí, pretože pravdepodobnosti prechodov sa v čase menia (napr. vplyvom meniaceho sa dopravného zaťaženia alebo klimatických pomerov), zvlášť pokiaľ chceme predpovedať vývoj na dlhšie časové obdobie.

Degradačný model vyjadruje tzv. prechodová matica $P = [p_{ij}]$, kde p_{ij} je pravdepodobnosť, že vozovka prejde zo stavu i do stavu j za jednotkový čas (typický rok). Postupnosť stavov je utriedená od najlepšieho k najhoršiemu.

Pre prechodovú maticu degradácie vozoviek platí, že:

1. $p_{ij} = 0, j > i$ (vozovka nemôže prejsť z horšieho stavu do lepšieho),
2. $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, 1 \leq i \leq n$.

kde n je počet možných stavov, v ktorých sa vozovka môže nachádzať.

Degradačné závislosti modelovanej premennej od typu konštrukcie vozovky, dopravného zaťaženia a klimatických pomerov môžeme modelovať implicitne prostredníctvom rodín vozoviek.

Prechodová matica pre rodinu vozoviek sa zostaví štatistickou analýzou dát o stave vozoviek (je možné využiť krivky životnosti) alebo v najhoršom prípade sa dá zostrojiť expertným odhadom.

Ak riadkový vektor Y_y vyjadruje pravdepodobnostnú distribúciu medzi jednotlivé stavy vozovky na úseku v čase y , potom riadkový vektor $Y_y \cdot P$ bude vyjadrovať pravdepodobnostnú distribúciu v nasledujúcom časovom kroku $y + 1$.

Markovov degradačný model sa dá využiť na jednoduché štatistické predikcie vývoja stavu celej cestnej siete, ako ukazuje nasledujúci príklad.

Pre ilustráciu uvažujme Markovovu päťstavovú prechodovú maticu pre stavy z vyhodnotenia hlavných prehliadok ciest (veľmi dobrý, dobrý, vyhovujúci, nevyhovujúci, havarijný):

$$P = \begin{bmatrix} 0,88 & 0,1 & 0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0,11 & 0,08 & 0,01 \\ 0 & 0 & 0,7 & 0,25 & 0,05 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Hodnoty v matici sú len ilustračné; neboli odvodené z dát prehliadok.)

V roku 2018 (v modeli rok 0) na základe vyhodnotenia stavu cestnej siete v aplikácii IS MCS ESCeS bolo 51,53 % ciest I. triedy vo vyhovujúcom stave, 2,27 % v dobrom stave, 6,68 vo vyhovujúcom stave, 31,75 % v nevyhovujúcom stave a 7,77 % v havarijnom stave, čo vieme reprezentovať riadkovým vektorom:

$$Y_0 = \begin{bmatrix} 51,53 \\ 2,27 \\ 6,68 \\ 31,75 \\ 7,77 \end{bmatrix}^T$$

Zo vzťahu:

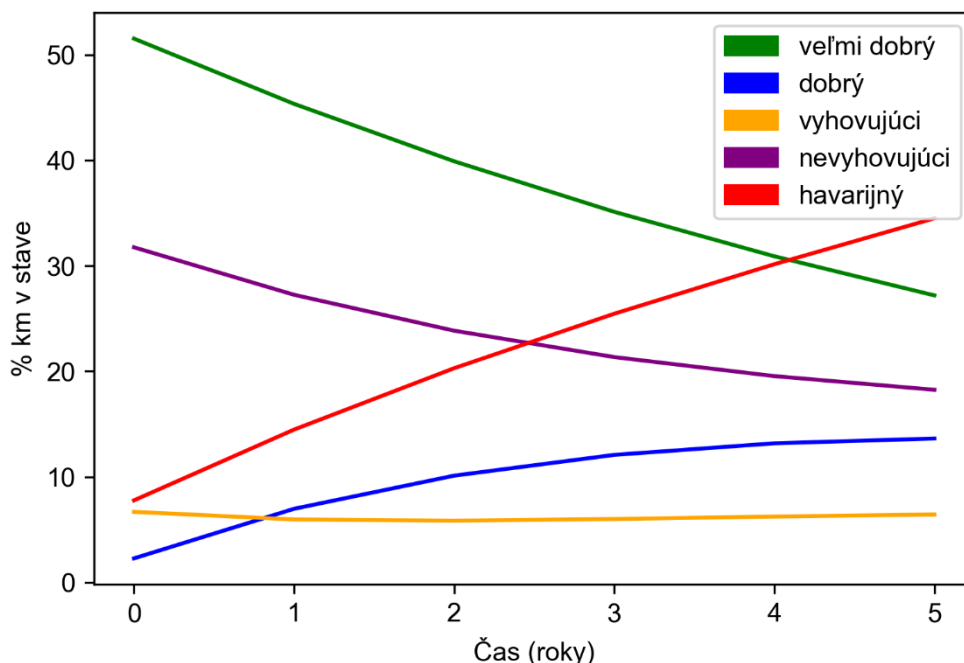
$$Y_{y+1} = Y_y \cdot P$$

potom vieme spočítať predpokladané percentá ciest I. triedy v jednotlivých stavoch ľubovoľný počet rokov dopredu.

Napríklad v nasledujúcom roku (rok 1) by bolo percentuálne rozdelenie nasledovné:

rok	veľmi dobrý	dobrý	vyhovujúci	nevyhovujúci	havarijný
0	51,53 %	2,27 %	6,68 %	31,75 %	7,77 %
1	45,35 %	6,97 %	5,96 %	27,25 %	14,48 %

Projekciu na 5 rokov dopredu za predpokladu, že sa nebudú realizovať žiadne rehabilitácie (správca nebude mať žiadne financie), ukazuje nasledujúci graf:



Obrázok 9 Graf predpokladaného vývoja percentuálneho rozdelenia stavu ciest I. triedy z Markovovho modelu

2.5.3 Semi-markovove modely

V predchádzajúcej kapitole sme spomenuli, že predpoklad o stacionarite procesu degradácie vozoviek v praxi neplatí.

Semi-markovove modely sa s týmto problémom vysporiadajú tak, že modelovaný životný cyklus vozovky delia na časti, v ktorých už predpokladajú stacionaritu degradačného procesu.

Prakticky sa potom pri projektovaní stavového rozdelenia v budúcnosti vymieňajú prechodové matice v časových krokoch, v ktorých sa modeluje prerušenie stacionarity procesu.

2.6 Zahraničné modely

2.6.1 Úvod

V tejto podkapitole je popísaných niekoľko zahraničných degradačných modelov, ktoré sa využívajú v reálnej praxi. Uvedené sú modely na oboch krajoch zložitosti – jednoduché lineárne rekurentné modely až po komplexný model HDM-4.

Cieľom tejto kapitoly je poskytnúť prehľad prístupov k modelovaniu degradácií, aké rodiny vozoviek sa využívajú a aké nezávislé premenné sa zvyknú uvažovať.

2.6.2 Modely zhrnuté v COST-324

Koncom 90. rokov minulého storočia bol realizovaný projekt COST 324: Long term performance of road pavements (Dlhodobý výkon cestných vozoviek) [13]. Participovalo na ňom 15 európskych krajín počas troch rokov a v rámci neho sa okrem iného realizovali národné štúdie používaných degradačných modelov.

Zozbierané degradačné modely vhodné pre úroveň cestnej siete sú zosumarizované v tejto podkapitole podľa krajín a modelovaných parametrov.

2.6.2.1 Belgicko

Celkový index (Global Quality Index)

Model bol pripravený pre vozovky s nízkym dopravným zaťažením pre tri funkčné triedy a netuhé aj tuhé vozovky:

$$G = A - T \cdot B \cdot Y$$
$$A = \frac{V + U}{2}$$
$$V = 0,9 - \frac{\sum l \cdot p}{CP}$$
$$U = 1 - \frac{CP}{10 * CP_{\min}}$$

kde:

- G je celkový index kvality,
- A je súčasná hodnota indexu počítaná z merania,
- T je súčiniteľ dopravy,
- B je parameter súvisiaci s údržbou,
- Y je časová premenná [roky],
- V je vizuálny index,
- U je štruktúrny index,
- l je podiel plochy pokrytý každou z 9 druhov porúch,
- p je váha pre každú z týchto porúch,
- CP je koeficient nerovnosti pre krátke vlnové dĺžky (< 2,5 m).

2.6.2.2 Španielsko

Index štruktúrnych porúch

Index štruktúrnych porúch modeluje štruktúrne trhliny:

$$ID = ND^a \cdot 10^b$$

kde:

- ID je index štruktúrnych porúch,
- NV je počet zaťažení vozidlami,
- a, b sú konštanty určené z tabuliek podľa konštrukcie vozovky (a v intervale približne 0,10 – 1,73 a b v intervale 0,61 – 1,85).

2.6.2.3 Rakúsko

Tento model je uvedený v správe projektu COST-324 a na sieťovej úrovni uvažuje len vývoj priečných nerovností asfaltových vozoviek.

Priečne nerovnosti

$$t = a \cdot \sqrt{N}$$

kde:

- t je hĺbka koľaje [mm],
- N je počet zaťažení ekvivalentnou štandardnou nápravou (10 t),
- a je empiricky určený faktor závislý na konštrukcii vozovky.

2.6.2.4 Fínsko

Pozdĺžne nerovnosti (IRI)

Jednoduchý lineárny rekurentný model:

$$IRI_{t+1} = a + b \cdot IRI_t$$

kde:

IRI_{t+1} je predikcia IRI pre rok $t + 1$,

IRI_t je namerané IRI v roku t ,

a, b sú parametre modelu podľa typu konštrukcie vozovky.

Priečne nerovnosti

Ide o rekurentný vzorec pre asfaltové vozovky:

$$RD_p = RD_m + \left(\frac{RD_m - 2,0}{AGE_{orm}} \right) \cdot AGE_{mp}$$

kde:

RD_p je predpovedaná hĺbka koľaje [mm],

RD_m je nameraná hĺbka koľaje [mm],

AGE_{orm} je počet rokov od posledného zosilnenia vozovky k roku merania,

AGE_{mp} je počet rokov od merania k roku predpovede hĺbky koľaje.

Štruktúrne trhliny

$$N_{10} = 5,63 + 0,000093 \cdot BCAP - 55,85 \cdot \left(\frac{BCAP}{N_{10,year}} \right)$$

kde:

N_{10} je počet nápravových zaťažení (10 t) do výskytu prvých trhlín,

$BCAP$ je únosnosť vyjadrená modulom pružnosti [MPa],

$N_{10,year}$ je počet nápravových zaťažení ročne (10 t).

Index porúch povrchu

$$DI_p = \frac{DI_m}{AGE_{om}^b} \cdot AGE_{op}^b$$

kde:

DI_p je predpovedný index porúch [$m^2/100 m$],

DI_m je aktuálny (nameraný) index porúch,

AGE_m je vek od poslednej výmeny krytu do roku merania,

AGE_{op} je vek od poslednej výmeny krytu do roku predikcie,

b je konštanta: 1,6 pre AC kryt a 1,8 pre kryt zo studenej zmesi.

2.6.2.5 Maďarsko

Pozdĺžne nerovnosti (IRI)

Sigmoidný model v dvoch variantoch nezávislej premennej:

$$IRI = e^{a+b \cdot AGE}$$

$$IRI = e^{a+b \cdot FORG}$$

AGE je vek obrusnej vrstvy vozovky,

$FORG$ je počet opakovaných prejazdov ekvivalentných osobných vozidiel (PCU).

Priečne nerovnosti

Sigmoidný model v dvoch variantoch nezávislej premennej:

$$RUT = e^{a+b.AGE}$$
$$RUT = e^{a+b.FORG}$$

kde:

AGE je vek obrusnej vrstvy vozovky,

FORG je počet opakovaných prejazdov ekvivalentných osobných vozidiel (PCU).

Únosnosť

$$E = a - b.AGE$$
$$E = a - b.FORG$$

kde:

AGE je vek obrusnej vrstvy vozovky,

FORG je počet opakovaných prejazdov ekvivalentných osobných vozidiel (PCU).

2.6.2.6 Holandsko

Priečne nerovnosti

AASHO tvar:

$$P = 1 - \left(\frac{t}{T}\right)^{0,63}$$

2.6.3 Írsko

Írska NRA (The National Roads Authority – Národná správa ciest) používa deterministické empirické modely. Základné vzťahy sú prebraté z iných krajín a lokálne kalibrované. [14]

Priečne nerovnosti sa vyjadrujú cez IRI a LPV-3. Model IRI vychádza z rakúskeho rekurentného modelu:

$$IRI_t = IRI_{t-1} + (a + b.ESAL_t.0,41.10)$$

kde:

ESAL_t je počet prejazdov jednoosových návrhových náprav (80 kN) v roku *t* v miliónoch,

IRI_t je hodnota IRI v roku *t*,

a, b sú kalibračné parametre.

Pozdĺžne nerovnosti sa vyjadrujú absolútnym explicitným mocninovým modelom, ktorý je prebratý z Belgicka:

$$RD_t = A. (0,41. cumESAL_t)^b$$

kde:

cumESAL_t je kumulatívny počet prejazdov jednoosových návrhových náprav (80 kN) do roku *t* v miliónoch,

A, b sú kalibračné parametre.

Pri predikcii hĺbky koľaje sa využíva úseková kalibrácia na báze backcastingu.

Šmykový odpor sa vyjadruje koeficientom šmyku a rekurentným degradačným modelom prebratým z Belgicka:

$$CSC_t = CSC_{t-1} + a. ESAL_t. 0,41$$

2.6.4 Illinois, USA

Hlavným indikátorom kvality vozoviek v štáte Illinois je tzv. index CRS - Condition Rating Survey. Zvedený je veľmi dlho a vychádza z princípov hodnotenia funkčnosti vozoviek z AASHTO testu – hodnotenie panelom expertov na stupnici od 9,0 (výborný stav) po

1,0 (terminálna hodnota). Nabehnutím na systém hromadného zberu parametrov IRI, RUT a porúch povrchu vozovky na úrovni cestnej siete boli pripravené lineárne regresné modely [15]:

$$CRS = a_0 - x \cdot IRI - y \cdot RUT - z \cdot Faulting - a \cdot A - b \cdot B - c \cdot C - \dots$$

kde

x, y, z sú koeficienty pre dáta senzorov,

$a, b, c, \dots$ sú regresné koeficienty pre jednotlivé poruchy,

$A, B, C, \dots$ sú hodnoty závažnosti výskytu porúch (1-5).

Pre asfaltové vozovky je definovaných 13 typov porúch.

Začiatkom 90. rokov bola na základe dát nájdená degradačná funkcia pre CRS v tvare [7]:

$$CRS = 9 - 2 \cdot a \cdot THICK^b \cdot AGE^c \cdot CESAL^d$$

kde:

$THICK$ je hrúbka CB dosky, nového asfaltového krytu (nad CB vozovkou) alebo hrúbka asfaltovej vozovky,

AGE je počet rokov od poslednej rekonštrukcie alebo nového krytu,

$CESAL$ je akumulovaný počet ESAL od poslednej rekonštrukcie alebo nového krytu,

a, b, c, d sú parametre podľa typu konštrukcie vozovky.

Kalibráciou „backcastingom“ na dáta konkrétneho úseku dostaneme formu:

$$CRS_{future} = 9 - 2 \cdot a \cdot THICK^b \cdot (C_1 + \Delta YEAR)^c \cdot (C_2 + \Delta CESAL)^d$$

$$C_1 = \left(\frac{9 - CRS}{2 \cdot a \cdot THICK^b \cdot ESALPYR^d} \right)^{\frac{1}{c+d}}$$

$$C_2 = C_1 \cdot ESALPYR$$

kde

CRS je aktuálna hodnota CRS,

$\Delta YEAR$ je počet rokov predikcie do budúcnosti,

$\Delta CESAL$ je prírastok opakovaného zaťaženia ESAL do roku predikcie,

$ESALPYR$ je aktuálny ročný počet ESAL.

Časť cestnej siete spravuje Illinois Tollway System, ktorý si adaptoval degradačné modely pre svoje potreby [16]. Používa 7 typov konštrukcie vozoviek (CRCP, JPCP-20 a JPCP-15 – škáry s dĺžkou 20, resp. 15 stôp, HMA-JPCP-20 – asfaltový kryt na vozovke JPCP-20, HMAC – celiasfaltová vozovka, SMA-JPCP – SMA kryt na JPCP-20, D-Crack – asfaltový kryt na JPCP vozovke bez klzných trťov s premennou vzdialenosťou škár medzi 12 až 20 stôp).

V systéme GIS-ILLINOIS 2.0 sú použité lineárne rekurentné degradačné modely pre CRS v tvare [17], [15]:

$$FutureCRS = CurrentCRS - DeductValue \cdot Years$$

Degradačný model hodnoty $DeductValue$ (ročné zníženie hodnoty CRS) je vyvinutý pre rodiny vozoviek podľa kategórie (medzištátne cesty a ostatné), typu konštrukcie vozoviek (JRCP, JPCP, CRCP, HMAC, ACJR, ACCR), výskytu D-trhlín a intervalu aktuálneho CRS (dva intervaly s bodom zlomu 6,5).

Pre IRI a RUT je vyvinutý podobný rekurentný model:

$$FutureIRI = CurrentIRI + a \cdot Years$$

$$FutureRUT = CurrentRUT + a \cdot Years$$

IRI model bol vyvinutý pre 6 rovnakých typov konštrukcie vozoviek ako pre model CRS; model RUT len pre HMAC, ACJR a ACCR (všetky s hodnotou $a = 0.005$).

Tieto dva modely boli uvedené v literatúre ako dočasné.

V roku 2007 bol model aktualizovaný a používa 9 typov konštrukcie vozoviek [15]: asfaltové (ACP), asfaltový kryt na prostej doskovej cementobetónovej vozovke (AC/JPCP), asfaltový kryt na vystuženej doskovej cementobetónovej vozovke (AC/JRCP), asfaltový kryt na spojitostu vystuženej cementobetónovej vozovke (AC/CRCP), vystužená dosková cementobetónová vozovka (JRCP), vystužená dosková cementobetónová vozovka s kotvami (HJCP), spojitostu vystužená cementobetónová vozovka (CRCP) a kompozitné vozovky s prevažnou asfaltovou zložkou a s prevažnou cementobetónovou zložkou.

Výskum prebiehal aj modelovaní degradácií jednotlivých porúch. Koncepty pre modely rozvoja 6 typov porúch sa dajú nájsť v [6].

2.6.5 Washinton, USA

V štáte Washington má systém hospodárenia s vozovkami veľmi dlhú tradíciu. Legislatívne ukotvenie SHV začína už v roku 1963 (štátny zákon RCW 47.05 o prioritnom programovaní rozvoja ciest – Priority Programming for Highway Development). Dáta o stave vozoviek sa zberajú systematicky od roku 1965 a prvý informačný systém pre SHV vyvinuli koncom 70. rokov. Od roku 1988 sa údaje na všetkých štátnych cestách zberajú ročne (predtým dvojročne). Merania sa realizujú vlastnou diagnostickou technikou – multifunkčným vozidlom (fotografie cesty spoza čelného skla a fotografie cesty, priečny a pozdĺžny profil pre výpočet IRI, vyjazdených koľají asfaltových vozoviek a schodíkovania betónových vozoviek) a vozidlom pre meranie protišmykových vlastností (friction testing truck and trailer). Z fotografií sa následne v kancelárii manuálne odvádzajú poruchy povrchu vozovky.

Zavedené sú tri základné nekompozitné indexy, ktoré hodnotia stav na škále 0 (havarijný stav) po 100 (výborný stav), pričom vo všeobecnosti hodnota okolo 50 indikuje včasnú potrebu nejakého zásahu [18]:

- PSC – Pavement Structural Condition (štruktúrny stav vozovky). Počíta sa z tzv. ekvivalentných trhlín mocninovou prevodovou funkciou. Hodnota ekvivalentných trhlín sa počíta z sieťových trhlín, priečnych a pozdĺžnych trhlín a lokálnych opráv (patching), u ktorých sa predpokladá, že boli realizované práve kvôli sieťovým trhlinám. Podrobný výpočet je v prílohe E v [19],
- PRC – Pavement Rutting Condition (stav vozovky z hľadiska vyjazdených koľají) – prepočítava sa lineárnou funkciou z hĺbky vyjazdených koľají,
- PPC – Pavement Profile Condition (stav vozovky z hľadiska profilu) – prepočítava sa z IRI lineárnou funkciou.

Všeobecný degradačný model je predpísaný funkciou:

$$PSC = C - m \cdot A^P$$

kde:

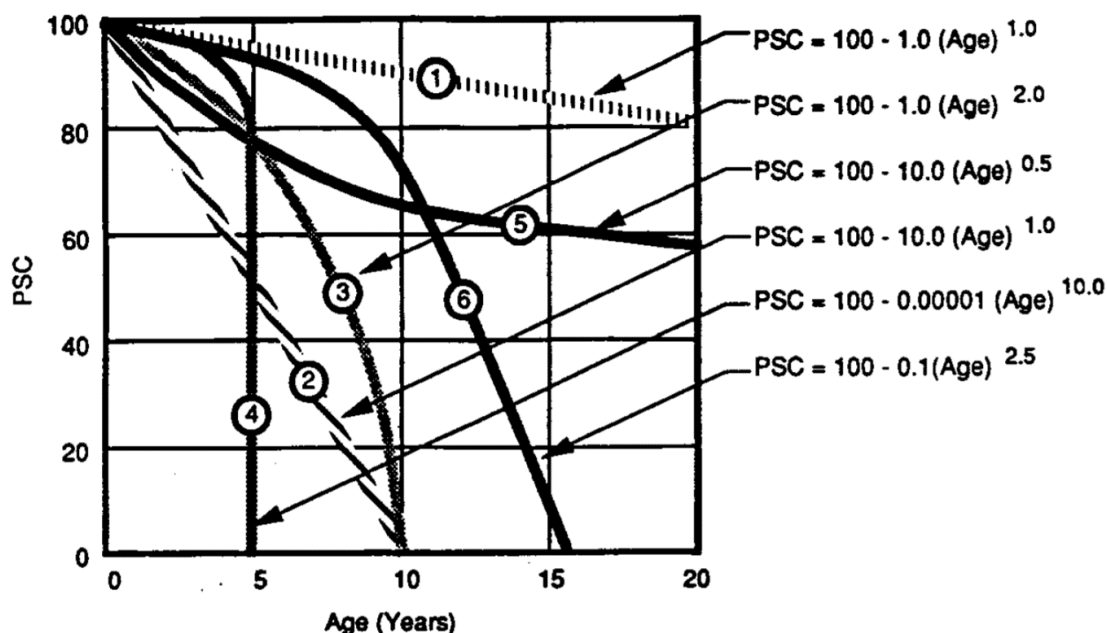
C je konštanta škálujúca výstup modelu do hodnoty 100 pre výborný stav,

m je koeficient modelu určujúci sklon krivky,

A je nezávislá premenná – vek vozovky ako čas od poslednej výmeny krytu alebo novostavby,

P je konštanta modelu určujúca zakrivenie krivky.

Niektoré krivky sú pre vybrané hodnoty parametrov m a P sú znázornené na obrázku:



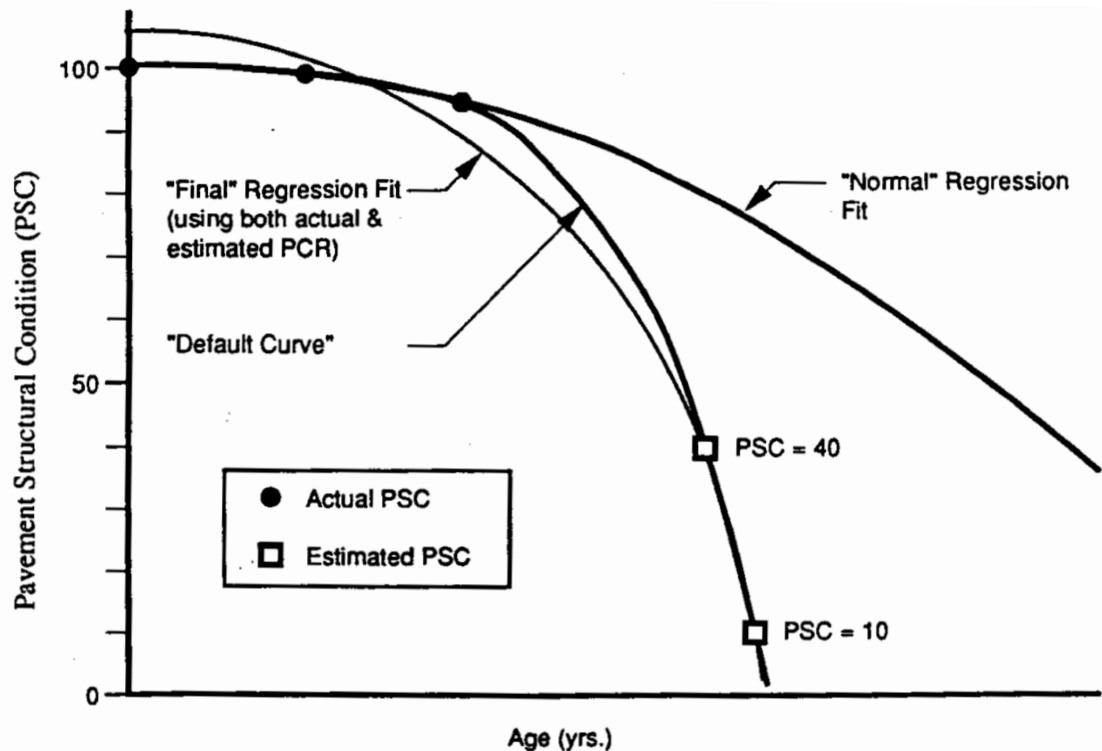
Obrázok 10 Znáznornenie priebehu kriviek modelu WSDOT pre vybrané hodnoty parametrov (prebraté z [19])

Predikcia sa vykonáva použitím špeciálnej úsekovej kalibrácie podľa princípu „let the section speak for itself“ („nech prehovorí za seba každý úsek“). V prípade, že na úseku sa nachádza od stavby alebo poslednej výmeny krytu tri alebo viac meraní, postupuje sa nasledovne: k poslednému bodu sa vloží krivka všeobecného modelu, z ktorej sa odčítajú dva body. Tieto sa vložia do sekvencie nameraných bodov a z tejto sekvencie sa vytvorí finálny úsekovo-špecifický degradačný model (pozri obrázok nižšie). Pokiaľ na úseku je menej meraných bodov, použije sa rovno krivka všeobecného modelu. Tento proces zabraňuje príliš optimistickej predpovedi, ktorú produkovali regresné krivky na úseku len z meraných dát.

Všeobecné modely sa vytvárajú pre každú rodinu vozoviek danú:

- funkčnou klasifikáciou: (medzištátna cesta, veľká arteriálna cesta (principal arterial), malá arteriálna cesta (minor arterial) a veľká zberná cesta (major collector) – implicitne vyjadrujú dopravné zaťaženie),
- typom povrchu vozovky (asfaltový betón, náter – chip seal, cementový betón) a
- okresom (6 okresov; implicitne vyjadrujú rôzne klimatické podmienky).

Pre PSC majú tieto modely exponent zakrivenia (P) okolo 2, teda ide o konvexné krivky. Krivky pre PRC ho majú vždy 1, ide teda o lineárne modely.



Obrázok 11 Proces tvorby úsekovo-špecifického degradačného modelu. Prebraté z [19].

2.6.6 AASHTO návrhový model pre netuhé vozovky

Degradačný model vychádza zo základnej rovnice návrhového modelu netuhých vozoviek AASHTO, ktorý udáva požadované štruktúrne číslo SN vozovky v závislosti od výhľadového opakovaného dopravného zaťaženia a požadovanej hodnoty funkčného indexu PSI na konci návrhovej životnosti vozovky. Zo štruktúrneho čísla potom projektant odvádza konštrukciu novej vozovky. Obmenou vzťahu je možné vytvoriť degradačný model pre funkčný index PSI .

Rekurentný vzťah udáva závislosť zmeny indexu PSI od realizovaného dopravného zaťaženia (hlavná nezávislá premenná) a štruktúrnych parametrov vozovky (modul pružnosti podložia a štruktúrne číslo vozovky):

$$\log_{10}(N_t) = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0,2 + \frac{\log_{10} \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log_{10} M_R - 8,07$$

kde

ΔPSI je modelovaná zmena hodnoty PSI ,

Z_R a S_0 sú Z hodnota pre daný interval spoľahlivosti (určený funkčnou klasifikáciou a či vozovka je v intraviláne alebo extraviláne) a kombinovaná štandardná odchýlka predpovede dopravného zaťaženia a degradácie (pre netuhé vozovky sa odporúča voliť v intervale 0,4 – 0,5),

SN je štruktúrne číslo vozovky, udávajúce jej únosnosť,

M_R je modul pružnosti podložia (resilient modulus) [psi],

N_t je počet opakovaných zaťažení americkou návrhovou nápravou 80 kN (ESAL).

Podobná funkcia existuje aj pre tuhé vozovky.

Úpravou základného vzťahu pre asfaltové vozovky dostaneme vyjadrenie pre hodnotu PSI v čase t v závislosti od celkového dopravného zaťaženia [20]:

$$PSI_t = PSI_0 - (4,2 - 1,5) \cdot 10^{(\log_{10} W_{18} - Z_R \cdot S_0 - 9,36 \cdot \log_{10}(SN+1) + 0,2 - 2,32 \cdot \log_{10} M_R + 8,07) \cdot \left(0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}\right)}$$

2.6.7 Model OPAC (Ontário, Kanada)

Modelovaná premenná je funkčný index RCI (Riding Comfort Index) nadobúdajúci hodnoty od 10 (vynikajúci stav; novostavba) až po 0 (najhorší stav). Ide o typický mechanisticko-empirický model.

Rekurentný vzťah udáva závislosť zmeny funkčného indexu RCI od realizovaného dopravného zaťaženia (hlavná nezávislá premenná), štruktúrnych parametrov vozovky a regionálnej korekcie:

$$\Delta RCI = RCI_0 - (P_T + P_E)$$

kde

ΔRCI je zmena v RCI ,

RCI_0 je počiatočná hodnota RCI na novostavbe vozovky,

P_T je degradačný úbytok RCI vyvolaný dopravou,

P_E je degradačný úbytok RCI vyvolaný prostredím.

Tento vzťah je rozvinutý takto:

$$\Delta RCI = RCI_0 - \left[(2,4455\Psi + 8,805\Psi^3) + \left(RCI_0 - \frac{RCI_0}{1 + \beta_w} \right) (1 - e^{-\alpha Y}) \right]$$

$$\Psi = 3,7238 \cdot 10^6 w^6 N$$

kde:

w je Odemarkov priehyb podložia [mm],

N je počet opakovaných zaťažení americkou návrhovou nápravou, ktorá spôsobí udávanú zmenu ΔPCI ,

α je regionálna konštanta (napr. pre južné Ontário stanovená na 60),

β je regionálna konštanta (napr. pre južné Ontário stanovená na 0,006),

Y je vek vozovky [roky].

Konštanty α a β sú kalibrované regresiou z meraných údajov.

Odemarkov priehyb podložia je možné vypočítať ako:

$$w = \frac{9,000 \times 25,4}{2M_s \left(0,9 \cdot H_e \sqrt[3]{\frac{M_2}{M_s}} \right) \sqrt{1 + \frac{6,4}{0,9 \cdot H_e \sqrt[3]{\frac{M_2}{M_s}}}}}$$

kde:

M_s je modul pružnosti podložia [MPa],

M_2 je modul pružnosti podkladu (na báze kameniva) [MPa],

H_e je tzv. ekvivalentná hrúbka na báze kameniva [mm] (súčet hrúbok jednotlivých vrstiev vážených cez prevodové súčinitele).

Tento model bol v koncom 90. rokov minulého storočia aktualizovaný v rámci štúdie [21].

2.6.8 Poľsko

V Poľsku sú degradačné vzťahy popísané v rámci metodiky systému DSN – Diagnostiky stavu vozoviek [22]. Boli vyvinuté v roku 2005 na základe údajov meraní z dlhodobého

sledovaných úsekov. Všetky sú deterministické a uvádzame ich vzťahy s popisom v nasledujúcom texte.

Maximálna povolená dĺžka predikčného obdobia pri modelovaní predpovede degradácií vozoviek s použitím týchto modelov je obmedzená v predpise na 6 rokov.

2.6.8.1 Pozdĺžne nerovnosti

$$IRI = IRI_0 \cdot e^{0,033 \cdot (t - t_0)}$$

kde:

IRI je predpovedaná hodnota IRI v roku t [mm/m],

IRI_0 je nameraná hodnota IRI v roku t_0 [mm/m].

2.6.8.2 Hĺbka vyjazdených koľají

$$KO = KO_0 \cdot e^{0,045 \cdot (t - t_0)}$$

kde:

KO je hodnota hĺbky vyjazdených koľají v roku t [mm],

KO_0 je nameraná hodnota hĺbky vyjazdených koľají v roku t_0 [mm].

2.6.8.3 Protišmykové vlastnosti

Pre $YAX < 0,413$:

$$SN = SN_0 - 0,2538 \cdot YAX \cdot (t - t_0)$$

pre $YAX \geq 0,413$:

$$SN = SN_0 - 0,1047 \cdot (\ln(YAX) + 1,8596) \cdot (t - t_0)$$

kde:

SN je hodnota súčiniteľa trenia v roku t ,

SN_0 je nameraná hodnota súčiniteľa trenia v roku t_0 ,

YAX je priemerný ročný počet náprav v miliónoch v jednom pruhu medzi rokmi t_0 až t [mil/pruh/rok].

2.6.8.4 Indikátor trhlín

Model indikátora trhlín PN je popísaný cyklickou imperatívnou formou:

$$n = PN_0$$

V cykle vykonávajú pre i od t_0 do $t - 1$:

$$np = n + \left(\frac{a}{n} + b\right) \cdot \frac{(\alpha \cdot \ln(ESAL(i)) + \beta)}{2 \cdot \gamma}$$
$$n = n + \left(\frac{a}{np} + b\right) \cdot \frac{\alpha \cdot \ln\left(\frac{ESAL(i) + ESAL(i+1)}{2}\right) + \beta}{\gamma}$$

Nakoniec:

$$PN = n$$

kde:

$$\alpha = -0,016,$$

$$\beta = 0,0099,$$

$$\gamma = -0,0839,$$

$$a = -0,09,$$

$$b = 0,0847,$$

PN je hodnota indikátora trhlín v roku t ,

PN_0 je nameraná hodnota indikátora trhlín v roku t_0 ,

$ESAL(i)$ je počet prejazdov štandardných náprav (100 kN) na jeden jazdný pruh v roku i .

2.6.8.5 Indikátor stavu povrchu

$$PP = PP_0 \cdot e^{-0,0682 \cdot (t - t_0)}$$

kde:

PP je hodnota indikátora stavu povrchu vozovky v roku t ,

PP_0 je nameraná hodnota indikátora v roku t_0 .

2.6.8.6 Únosnosť (priehyb)

$$\frac{dDEF}{dt} = 9061,6 \cdot Y_r \cdot H^{-1,72}$$

ekvivalentne v rekurentnej forme:

$$DEF = DEF_0 + 9061,6 \cdot Y_r \cdot H^{-1,72} \cdot (t - t_0)$$

kde:

DEF je normalizovaný priehyb (t.j. prepočítaný na porovnávaciu teplotu a zaťažovaciu silu),

Y_r je ročný počet prejazdov náprav (100 kN) v jednom pruhu,

H je hrúbka asfaltových vrstiev,

DEF_0 je priehyb v roku t_0 .

2.6.9 HDM-4

Degradačný model HDM-4 patrí k jedným z najprepracovanejších a súčasne tak k najzložitejším modelom. Podrobné informácie k modelu je možné nájsť v dokumentácii HDM-4 [23].

Model priznáva celkovo 33 rôznych typov vozoviek z hľadiska konštrukcie, kde smerodajná je kombinácia typu povrchu (napr. asfaltová zmes alebo prostý betón) a podkladu (napr. stabilizovaný podklad alebo betónový podklad). Pokiaľ sa realizuje niektorá z metód súvislej údržby na povrchu, táto sa priznáva ako samostatný typ povrchu.

Používajú sa tak rekurentné, ako aj absolútne explicitné vzťahy (len vozovky s betónovým povrchom).

Pre asfaltové vozovky sa modeluje:

- vznik štyroch porúch povrchu (trhliny, vypieranie, výtlky a rozpad okrajov),
- hĺbka vyjazdených koľají,
- pozdĺžne nerovnosti (IRI),
- hĺbka makrotextúry a šmykový odpor.

Modely vzniku trhlín, vypierania a výtlkov sa skladajú z iniciačnej fázy a progresívnej (rozvojovej) fázy.

Pre betónové vozovky sa modelujú:

- štyri poruchy (trhliny, vertikálne nerovnosti na škárach (schodíkovanie) alebo trhlínach, rozpady betónu na škárach, poruchy výstuže a súvisiace poruchy spojitosti vystužených CB vozoviek),
- poklesu prevádzkovej funkčnosti (PSR),
- pozdĺžne nerovnosti (IRI).

HDM-4 modeluje aj degradácie odvodňovacích zariadení a v ďalších verziách by mali pribudnúť degradácie krajníc. Týmto prvkami sa nebudeme zaoberať.

Ďalej v stručnosti popíšeme len degradačný model asfaltových vozoviek, ktorý už samotný ja oveľa zložitejší ako ostatné popisované modely.

2.6.9.1 Všeobecné nezávislé premenné

Štruktúrna sila vozovky

Štruktúra sila vozovky udávajúca jej únosnosť sa vyjadruje v HDM-4 tzv. upraveným štruktúrnym číslom.

Vzťahy udávajúce jej výpočet sú uvedené v HDM-4; podstatné je, že sa dá vypočítať z priehybovej krivky FWD a plošného indikátora trhlín, teda z meraní a zisťovaní dostupných v našich podmienkach.

Klimatické pomery

HDM-4 triedi vozovky do zón podľa vlhkosti a teploty.

Trieda vlhkosti sa určuje na základe Thornthwaitovho indexu vlhkosti a ročného objemu zrážok. Trieda teploty sa určí podľa rozsahu dosahovaných teplôt vzduchu.

Kvalita konštrukcie

Kvalita materiálov a samotného postupu má určitý vplyv na následný rozvoj porúch.

Pre asfaltové vozovky sa v HDM-4 udávajú parametre *CDS*, *CDB* a *COMP*.

CDS je indikátor konštrukčných chýb nadobúdajúci spojité hodnoty od 0,5 po 1,5. Volí sa väčšinou expertným odhadom vo vzťahu k objemu spojiva a tuhosti vzhľadom na optimálny materiál pre danú asfaltovú zmes. Nízke hodnoty (menej spojiva) indikujú náchylnosť vozovky na trhliny a vypieranie a vyššie hodnoty (viac spojiva) na priečne nerovnosti vzniknuté plastickými deformáciami.

CDB je indikátor konštrukčných chýb podkladu využívaný pri modelovaní výtlkov. Ide o spojitú premennú v intervale od 0 (žiadne chyby; excelentná stavba) po 1,5 (niekoľko chýb). Orientačne HDM-4 udáva hodnoty 0,5 pre nedostatočné zhutnenie a nevhodnú zrnitosť alebo tvar kameniva.

COMP je miera relatívneho zhutnenia a má orientačné hranice 100 % (plne zhutnené všetky vrstvy) a 85 % (nekvalitne zhutnená väčšina vrstiev)

2.6.9.2 Trhliny

Modelujú sa dva druhy trhlín:

1. *štruktúrne trhliny* – trhliny spôsobené únavou materiálov vekom, dopravným zaťažením a externým vplyvom prostredia,
2. *priečne teplotné trhliny* – trhliny spôsobené zmenami teplôt v denno-nočných cykloch a cykloch zamŕzania a rozmŕzania.

Modelované premenné sú iniciačný čas a plošný prírastok trhlín v progresívnej fáze. Plocha trhlín sa vyjadruje ako plošný podiel plochy vozovky s trhlinami voči celkovej ploche vozovky. Plochou trhlín sa myslí obdĺžnik ohraničujúci trhlinu, kde sa uvažuje šírka 0,5 mm pri líniových trhlinách.

Štruktúrne trhliny

Štruktúrne trhliny sa modelujú v dvoch verziách – všetky a zvlášť široké štruktúrne trhliny. Širokými trhlinami sa myslia trhliny so šírkou nad 3 mm.

Iniciačný model predpovedá čas v rokoch, kedy nastupuje progresívna fáza. Tento čas zodpovedá momentu, kedy trhliny presiahnu 0,5 % plochy povrchu vozovky.

Iniciačný čas všetkých trhlín sa počíta komplikovaným vzťahom, preto ho uvádzame len ako bližšie nepopísanú funkciu f pre stabilizované podklady:

$$ICA = f(K_{CIA}, CDS, HSNEW, HSOLD, CMOD, DEF, CRT, YE4, PCRW, PCRA, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4)$$

a pre ostatné podklady:

$$ICA = f(K_{CIA}, CDS, SNP, YE4, PCRW, PCRA, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4)$$

kde:

K_{CIA}	je kalibračný faktor pre iniciačnú fázu všetkých trhlín,
CDS	je indikátor konštrukčných chýb asfaltových povrchov,
$HSNEW$	je hrúbka najnovšej vrstvy povrchu [mm],
$HSOLD$	je celková hrúbka prechádzajúcich vrstiev krytu [mm] (0, ak ide o novú vozovku),
$CMOD$	je modul pružnosti cementom stabilizovaného podkladu [GPa],
DEF	je priemerný priehyb pákového priehybomera (Benkelmanov nosník) v oboch jazdných stopách [mm],
CRT	je retardačný čas trhlín z dôvodu vykonanej údržby v rokoch,
$YE4$	je počet zaťažení štandardnou nápravou za rok [mil./pruh],
$PCRA$	je plošný podiel všetkých trhlín pred poslednou súvislou údržbou alebo opravou,
$PCRW$	je plošný podiel širokých trhlín pred poslednou súvislou údržbou alebo opravou,
SNP	je priemerné ročné upravené štruktúrne číslo vozovky,
a_0, a_1, a_2, a_3, a_4	sú konštanty, ktoré sú uvedené podľa konštrukcie vozovky.

Iniciačný čas širokých trhlín sa počíta z iniciačného času všetkých trhlín:

$$ICW = K_{CIW} \max(a_0 + a_1 \cdot ICA, a_2 \cdot ICA)$$

kde:

K_{CIW}	je kalibračný faktor pre iniciačnú fázu širokých trhlín,
a_0, a_1, a_2	sú konštanty uvedené pre daný typ konštrukcie vozovky.

Za zmienku stojí, že sú modelované aj účinky preventívnej údržby pri spomaľovaní iniciačného času vzniku trhlín, a to prostredníctvom retardačného času CRT :

$$CRT = \min \left(CRT_{bw} + \frac{CRM}{YAX}, \frac{CRTMAX}{YAX}, 8 \right)$$

kde:

CRT_{bw}	je retardačný čas vzniku trhlín pred aplikáciou preventívnej údržby,
CRM a $CRTMAX$	sú parametre nájdené v tabuľkách podľa technológie preventívnej údržby,
YAX	je ročný počet náprav všetkých typov vozidiel [mil./pruh].

Progresívna fáza následne modeluje prírastok plošného podielu všetkých ($dACA$) a širokých trhlín ($dACW$):

$$dACA = f(K_{cpa}, CRP, CDS, ACA_a, AGE2, ICA, a_0, a_1)$$

$$dACW = f(K_{cpw}, CRP, CDS, ACW_a, ACA_a, dACA, AGE2, ICW, a_0, a_1)$$

kde:

K_{cpa}	je kalibračný faktor rozvoja všetkých trhlín,
K_{cpw}	je kalibračný faktor rozvoja širokých trhlín,
CRP	je retardácia rozvoja trhlín kvôli vykonanej preventívnej údržbe ($CRP = 1 - 0,12 \cdot CRT$),

CDS je indikátor konštrukčných chýb asfaltových povrchov,
 ACA_a je plocha všetkých štruktúrnych trhlín na začiatku analyzovaného roku,
 ACA_w je plocha širokých štruktúrnych trhlín na začiatku analyzovaného roku,
 $AGE2$ je vek povrchu vozovky od poslednej ÚOR alebo stavby [roky],
 ICA je čas iniciácie všetkých štruktúrnych trhlín počítaný vyššie,
 ICW je čas iniciácie širokých štruktúrnych trhlín počítaný vyššie,
 a_0, a_1 sú konštanty uvedené v tabuľkách podľa konštrukcie vozovky.

Priečne teplotné trhliny

Podobne ako pri štruktúrnych trhlínach sa modeluje čas vzniku teplotných trhlín (iniciačná fáza) a následne sa modeluje ročný prírastok (progresívna fáza).

Pre čas iniciácie na novej vozovke platí:

$$ICT = K_{cit} \cdot \max(a_0, CDS \cdot CCT)$$

a pre vozovku po súvislej údržbe alebo oprave:

$$ICT = K_{cit} \cdot \max(a_0, CDS \cdot (CCT + a_1 + a_2 \cdot HSNEW))$$

kde:

K_{cit} je kalibračný faktor iniciácie teplotných trhlín,
 CDS je indikátor konštrukčných chýb asfaltových povrchov,
 CCT je koeficient teplotných trhlín, ktorý sa nájde v tabuľke podľa klimatickej zóny,
 $HSNEW$ je hrúbka najnovšej vrstvy povrchu [mm],
 a_0, a_1, a_2 sú konštanty, ktoré sa nájdu v tabuľke podľa konštrukcie vozovky.
Model prírastku počtu teplotných trhlín na kilometer $dNCT$ je už komplikovaný, preto uvádzame len nezávislé premenné:

$$dNCT = f(K_{cpt}, \frac{1}{CDS}, NCT_{eq}, NCT_a, AGE3, ICT, \frac{1}{T_{eq}^2}, PNCT, a_0)$$

kde:

K_{cpt} je kalibračný faktor rozvoja teplotných trhlín,
 CDS je indikátor konštrukčných chýb asfaltových povrchov,
 NCT_{eq} je maximálny počet teplotných trhlín na kilometer [km^{-1}], nájdený v tabuľke podľa teplotných klimatických pomerov,
 NCT_a je počet teplotných trhlín na kilometer na začiatku analyzovaného roku [km^{-1}],
 $AGE3$ je počet rokov od poslednej opravy, rekonštrukcie alebo stavby vozovky,
 $PNCT$ je počet teplotných trhlín pre poslednú SÚ/O,
 a_0 je konštanta nájdená v tabuľke podľa typu konštrukcie vozovky.

Sumárne štatistiky trhlín

Niektoré ďalšie degradačné moduly pracujú so sumárnymi štatistikami trhlín, ktoré sú odvodené od vyššie uvedených modelovaných premenných.

Tzv. *plocha indexovaných trhlín* ACX je vážený súčet plochy všetkých štruktúrnych trhlín ACA a plochy širokých štruktúrnych trhlín ACW :

$$ACX = 0,62 \cdot ACA + 0,39 \cdot ACW$$

2.6.9.3 Vypieranie

Vypieranie povrchu je modelované podobne ako trhliny v dvoch fázach – iniciačnej a progresívnej.

Čas do začiatku rozvoja (0,5 % plochy povrchu je klasifikovaného ako vypratý) v rokoch nájdeme ako:

$$IRV = K_{vi} \cdot CDS^2 \cdot a_0 \cdot RRF \cdot e^{a_1 \cdot YAX}$$

kde:

K_{vi} je kalibračný faktor iniciácie vypierania,

CDS je indikátor konštrukčných chýb asfaltových povrchov,

RRF je retardačný faktor vypierania z dôvodu vykonanej preventívnej údržby,

YAX je ročný počet náprav všetkých motorových vozidiel v analyzovanom roku [mil./pruh],

a_0, a_1 sú konštanty nájdene v tabuľkách podľa konštrukcie vozovky.

Retardačný čas RRF sa modeluje len na povrchoch, na ktorých už bola vykonaná nejaká súvislá údržba alebo oprava ako:

$$RRF = \min(RRF_{bw}, RRM, RRFMAX)$$

kde:

RRF_{bw} je retardačný faktor pred vykonaním preventívnej údržby,

RRM a $RRFMAX$ sa nájdú v tabuľke podľa konštrukcie vozovky.

Progresívna fáza modeluj prírastok vo vypratej ploche ročne a pre zložitý vzťah udávame len nezávislé premenné:

$$dARV = f\left(K_{vp}, \frac{1}{RRF}, \frac{1}{CDS^2}, ARV_a, YAX, AGE2, IRV, a_0, a_1, a_2\right)$$

kde:

K_{vp} je kalibračný faktor pre progresiu vypierania,

RRF je retardačný faktor vypierania z dôvodu vykonanej preventívnej údržby,

YAX je ročný počet náprav všetkých motorových vozidiel v analyzovanom roku [mil./pruh],

$AGE2$ je počet rokov od poslednej SÚ/O/R alebo stavby vozovky,

IRV je čas do vzniku vypierania,

a_0, a_1, a_2 sú konštanty z tabuliek podľa konštrukcie vozovky.

2.6.9.4 Výtlky

Výtlky vznikajú v kryte vozovky, ktorý je narušený trhlinami alebo vypratím. Výtlkom sa myslí v HDM-4 otvorené rozrušenie krytu o priemere aspoň 150 mm a hĺbkou aspoň 25 mm.

Modeluje sa podobne ako v predchádzajúcich prípadoch zvlášť iniciačná fáza a rozvojová (progresívna) fáza. Primárna modelovaná premenná je počet tzv. *výtlkových jednotiek*, ktoré majú plochu 0,1 m² a hĺbkou 100 mm. Progresívna fáza preto zahŕňa navyše aj možnosť zväčšovania existujúcich výtlkov v závislosti od nastavenej politiky vyspravovania výtlkov v rámci bežnej údržby.

Iniciačná fáza modeluje čas po vznik prvotných výtlkov:

$$IPT = K_{pi} \cdot a_0 \cdot \left(\frac{1 + a_1 HS}{(1 + a_2 \cdot CDB) \cdot (1 + a_3 \cdot YAX) \cdot (1 + a_4 \cdot MMP)} \right)$$

kde:

HS je celková hrúbka asfaltového krytu [mm],

CDB je indikátor konštrukčných chýb podkladu,

YAX je ročný počet náprav všetkých motorových vozidiel v analyzovanom roku [mil./pruh],

MMP je priemerný mesačný objem zrážok [mm/mes.],

K_{pi} je kalibračný faktor pre iniciáciu výtlkov.

IPT sa počíta zvlášť pre výtlky vzniknuté z trhlín a zvlášť z vypierania (vo vzťahu sa použijú rôzne hodnoty konštánt a_0, a_1, a_2, a_3, a_4).

Progresívna fáza modeluje zvýšený počet výtlkových jednotiek na kilometer a pozostáva zo súčtu zvýšeného počtu jednotiek kvôli trhlinám ($i = 1$), vypieraniu ($i = 2$) a zväčšeniu existujúcich výtlkov ($i = 3$):

$$dNPT = \sum_{i=1}^3 dNPT_i$$

a

$$dNPT_i = K_{pp} \cdot a_0 \cdot ADIS_i \cdot TLF \cdot \left(\frac{(1 + a_1 CDB) \cdot (1 + a_2 YAX) \cdot (1 + a_3 MMP)}{1 + a_4 HS} \right)$$

kde:

K_{pp} je kalibračný faktor pre rozvoj výtlkov,

$ADIS_i$ je plošný podiel širokých štruktúrnych trhlín ($i = 1$), plošný podiel vypierania ($i = 2$) alebo počet existujúcich výtlkov na 1 km; všetko na začiatku analyzovaného obdobia.

Parameter TLF udáva koeficient času od výskytu výtlku po jeho vyspravenie v rámci bežnej údržby (0,02 pre čas menej ako 2 týždne a 1,00 pre 12 mesiacov).

2.6.9.5 Rozpad okrajov

Rozpad okrajov vozovky sa chápe ako strata materiálu vozovky na jej samotných okrajov, predovšetkým vplyvom nízkej odolnosti v šmyku a opotrebovania. Typické rozpady okrajov je možné pozorovať na užších cestách s nespevnenými krajinami – čím bližšie jazdia vozidlá k okraju vozovky, tým lepšie predpoklady pre rozpad okrajov. Šírka vozovky je preto jedným z priamych vstupov do modelu, pričom rozpady okrajov sa modelujú len na vozovkách s maximálnou šírkou 7,5 m.

Rozpad okrajov sa modeluje ako objem straty materiálu na okraji vozovky v m^3/km .

$$dVEB = K_{eb} a_0 PSH \cdot AADT^2 ESTEP \cdot S^{a_1} \cdot \left(a_2 + \frac{MMP}{1000} \right) \cdot 10^{-6}$$

pričom

$$PSH = \max \left(\min \left(\max \left(a_3 + a_4 \cdot CW, \frac{CW_{mx} - CW}{a_5} \right), 1 \right), 0 \right)$$

kde:

$dVEB$ je ročná strata materiálu na okraji [m^3/km],

PSH je časový podiel, kedy vozidlá jazdia pri kraji vozovky,

$AADT$ je RPDl [voz./deň],

$ESTEP$ je rozdiel vo výške medzi vozovkou a krajinou [mm],

MMP sú priemerné ročné zrážky [mm/mesiac],

S je priemerná cestovná rýchlosť [km/h],

CW je šírka vozovky [m],

CW_{mx} je používateľom definovaná najväčšia šírka, pri ktorej sa majú modelovať rozpady okrajov; avšak najviac 7,5 m (predvolená hodnota je 7,2 m),

K_{eb} je kalibračný faktor pre rozvoj rozpadu okrajov,

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 sú konštanty nájdené v tabuľke podľa typu vozovky.

2.6.9.6 Priéčne nerovnosti

Priečne nerovnosti sú ireverzibilné deformácie vozovky spôsobené dopravou, ktoré sa postupne rozvíjajú v jazdných stopách vozidiel ako vyjazdené koľaje.

Ročný prírastok v hĺbke koľají ΔRDM v mm sa modeluje ako súčet príspevkov v ich prehĺbovaní z plastických deformácií, počiatočného zahusťovania (len 1. rok), štruktúrnych deformácií (od 2. roku) a nadmerného opotrebovania povrchu:

$$\begin{aligned}\Delta RDM &= RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW, \text{ pre } AGE4 \leq 1 \\ \Delta RDM &= \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW, \text{ pre } AGE4 > 1\end{aligned}$$

kde:

ΔRDM je ročný prírastok v celkovej priemernej hĺbke koľají v oboch jazdných stopách [mm],

RDO je hĺbka nerovností z dôvodu počiatočného zhutňovania [mm],

$\Delta RDST$ je ročný prírastok kvôli štruktúrnym deformáciám [mm],

$\Delta RDPD$ je ročný prírastok kvôli plastickým deformáciám [mm],

ΔRDW je ročný prírastok kvôli opotrebovaniu [mm],

$AGE4$ je počet rokov do poslednej rekonštrukcie alebo stavby vozovky.

Ročný prírastok sa pripočíta k hĺbke koľají na začiatku analyzovaného roka, ale celková výsledná hĺbka sa obmedzuje na najviac 100 mm.

Opotrebovanie sa modeluje len pri prejazdoch vozidiel s pneumatikami s hrotmi v zimnom období, ktoré sú na Slovensku zakázané (okrem vozidiel záchrannej služby), preto ich nebudeme popisovať.

Hĺbka koľají kvôli počiatočnému zhutňovaniu:

$$RDO = K_{rid} \cdot (a_0 \cdot (YE4 \cdot 10^6)^{a_1 + a_2 \cdot DEF} \cdot SNP^{a_3} \cdot COMP^{a_4})$$

kde:

RDO je hĺbka koľají kvôli počiatočnému zhutňovaniu [mm],

$YE4$ je počet ekvivalentných štandardných náprav [mil./pruh],

DEF je priemerný priehyb pákového priehybomeru (Benkelmanov nosník) [mm],

SNP je priemerné upravené štruktúrne číslo vozovky,

$COMP$ je miera relatívneho zhutnenia [%],

K_{rid} je kalibračný faktor pre počiatočné zhutňovanie.

Miera relatívneho zhutnenia má orientačné hranice 100 % (plne zhutnené všetky vrstvy) a 85 % (nekvalitne zhutnená väčšina vrstiev).

Prírastok k hĺbke koľají zo štruktúrnych deformácií je zložený z prírastku kvôli deformáciám bez trhlín $\Delta RDST_{uc}$ a s trhlinami $\Delta RDST_{crk}$:

$$\begin{aligned}\Delta RDST_{uc} &= K_{rst} (a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} COMP^{a_3}) \\ \Delta RDST_{crk} &= K_{rst} (a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} MMP^{a_3} ACX_a^{a_4})\end{aligned}$$

kde:

K_{rst} je kalibračný faktor rozvoja priečnej nerovnosti kvôli štruktúrnym deformáciám,

SNP je priemerné upravené štruktúrne číslo vozovky,

$YE4$ je ročný počet ekvivalentných štandardných náprav [mil./pruh],

$COMP$ je miera relatívneho zhutnenia,

MMP sú priemerné mesačné zrážky [mm/mes.],

ACX_a je plošný podiel tzv. indexovaných trhlín na začiatku analyzovaného roku,
 a_1, a_2, a_3, a_4 sú konštanty dohľadné v tabuľkách podľa typu prírastku (s trhlinami alebo bez).

Prírastok k hĺbke koľají kvôli plastickým deformáciám má všeobecný vzťah:

$$\Delta RDPD = K_{rpd} CDS^3 \cdot a_0 \cdot YE4 \cdot Sh^{a_1} \cdot HS^{a_2}$$

kde:

CDS je indikátor konštrukčných chýb,

$YE4$ je počet ekvivalentných štandardných nápad [mil./pruh],

Sh je rýchlosť ťažkých vozidiel [km/h],

HS je celková hrúbka asfaltového krytu [mm],

K_{rpd} je kalibračný faktor prírastku hĺbky koľají kvôli plastickým deformáciám,

a_0, a_1, a_2 sú konštanty nájdené v tabuľkách podľa typu krytu.

2.6.9.7 Pozdĺžne nerovnosti

Inkrementálne zmena IRI (ΔRI) je vyjadrená súčtom príspevkov k zvýšeniu IRI jednotlivých komponentov, ktoré spôsobujú pozdĺžnej nerovnosti:

$$\Delta RI = K_{gp} (\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t) + \Delta RI_e$$

kde:

K_{gp} je kalibračný faktor pre rozvoj pozdĺžnej nerovnosti,

ΔRI_s je príspevok štruktúrneho komponentu nerovností,

ΔRI_c je príspevok trhlín k nerovnostiam,

ΔRI_r je príspevok variácií priečnych nerovností k pozdĺžnym nerovnostiam,

ΔRI_t je príspevok výtlkov k nerovnostiam,

ΔRI_e je príspevok prostredia k nerovnostiam.

Model umožňuje používateľovi zvoliť horný limit na výslednú nerovnosť na konci analyzovaného obdobia (predvolený limit je 16 m/km).

Za mienku stojí, že v ekonomickom module HDM-4 má práve IRI prominentné postavenie, keďže nepriamo manifestuje aj takmer všetky poruchy a štruktúrne indikátory vozoviek, pričom sa používa priemerná hodnota medzi IRI na začiatku a konci analyzovaného roku.

Príspevok IRI zo štruktúrneho komponentu je založený na deformácii vozovky pod šmykovým napätím vzniknutým dopravným zaťažením:

$$\Delta RI_s = a_0 \cdot e^{m \cdot K_{gm} \cdot AGE^3} \cdot (1 + SNPK_b)^{-5} \cdot YE4$$

$$SNPK_b = \max(SNP_a - dSNPK; 1,5)$$

$$dSNPK = K_{snpk} \cdot a_0 (\min(a_1, ACX_a) \cdot HSNEW + \max(\min(ACX_a - PACX, a_2), 0) \cdot HSOLD)$$

kde:

K_{gm} je kalibračný faktor prostredia,

K_{snpk} je kalibračný faktor pre $SNPK$,

$SNPK_b$ je upravené štruktúrne číslo vozovky kvôli trhlinám na konci analyzovaného roku počítané podľa uvedeného vzorca,

SNP_a je upravené štruktúrne číslo vozovky na začiatku analyzovaného obdobia,

$dSNPK$ je zníženie upraveného štruktúrneho čísla vozovky kvôli trhlinám,

ACX_a je plošný podiel tzv. indexovaných trhlín,

PACX je predošlý plošný podiel indexovaných trhlín v pôvodnom kryte,

HSNEW je hrúbka aktuálneho krytu [mm],

HSOLD je celková hrúbka predošlých krytov pod aktuálnym krytom [mm],

AGE3 je počet rokov od poslednej O/R alebo stavby,

YE4 je počet štandardných náprav [mil./pruh],

m je koeficient prostredia (predvolené hodnoty sú v tabuľkách podľa vlhkosti a teploty prostredia).

Príspevok k zvýšeniu IRI kvôli trhlinám priamo je daný jednoducho ako:

$$\Delta RI_c = a_0 \cdot \Delta ACRA$$

kde:

$\Delta ACRA$ je inkrementálna zmena plošného podielu celkových trhlín.

Podobne príspevok k zvýšeniu IRI kvôli priečnym nerovnostiam je daný ako:

$$\Delta RI_r = a_0 \cdot \Delta RDS$$

kde:

ΔRDS je inkrementálna zmena štandardnej odchýlky počas analyzovaného obdobia.

Príspevok trhlín je daný potenciálom vozidiel naraziť na výtlk, čo závisí od možnosti vyhnutia sa výtlkom. Toto je modelované premennou *voľnosť v manévrovaní FM*:

$$FM = (\max(\min(0, 25 \cdot (CW - 3), 1), 0)) \cdot \max\left(1 - \frac{AADT}{5000}, 0\right)$$

kde:

CW je šírka vozovky [m],

AADT je RPD [voz./deň].

Potom už samotný inkrementálny príspevok závisí len od množstva výtlkov na začiatku analyzovaného roku, potenciálu tvorby ďalších výtlkov a politiky vysprávok výtlkov v rámci bežnej údržby počas roka:

$$\Delta RI_t = a_0 \cdot (a_1 - FM) \cdot \left[\left(NPT_a \cdot TLF + \frac{\Delta NPT \cdot TLF}{2} \right)^{a_2} - NPT_a^{a_2} \right], \text{ ak } TLF = 1$$
$$\Delta RI_t = a_0 \cdot (a_1 - FM) \cdot \Delta NPT \cdot \left(NPT_a + \frac{\Delta NPT}{2} \right)^{a_2}, \text{ inak}$$

kde:

NPT_a je počet výtlkov na začiatku analyzovaného obdobia,

TLF je čas do odstránenia výtlku (pozri časť o degradačnom modeli výtlkov),

ΔNPT je inkrementálna zmena v počte výtlkov počet roka [počet/km].

Príspevok k zvýšeniu IRI kvôli prostrediu spôsobujú hlavne fluktuácie teploty a vlhkosti a pohyby podložia:

$$\Delta RI_e = m \cdot K_{gm} \cdot RI_a$$

kde:

RI_a je IRI na začiatku analyzovaného roku,

m je koeficient prostredia,

K_{gm} je kalibračný faktor prostredia.

2.6.9.8 Hĺbka makrotextúry

Hĺbka makrotextúry v zmysle testu vysypaným a vyhladeným pieskom je modelovaná inkrementálne:

$$\Delta TD = K_{td} \cdot \left(ITD - TD_a - a_0 \cdot ITD \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{ITD - TD_a}{a_0 \cdot ITD}} + \Delta NELV \right) \right)$$

kde:

ΔTD je inkrementálna zmena v hĺbke makrotextúry,

ITD je počiatočná hĺbka makrotextúry pri zhotovení krytu [mm],

TD_a je hĺbka makrotextúry na začiatku analyzovaného roku,

$\Delta NELV$ je počet prejazdov ekvivalentný ľahkých vozidiel v analyzovanom roku, pričom jedno ťažké vozidlo alebo autobus je ekvivalentné 10 prejazdom ľahkých vozidiel,

a_0 je súčiniteľ závislosti od typu povrchu vozovky; odporúčané hodnoty sú uvedené v tabuľke.

K_{td} je kalibračný faktor pre hĺbku makrotextúry.

Odporúčané hodnoty pre ITD a a_0 pre asfaltové vozovky sú:

Typ povrchu	Typ materiálu povrchu	ITD	a_0
asfaltová zmes (AM)	asfaltový betón (AC)	0,7	0,005
	vtláčaný asfaltový koberec (HRA)	0,7	0,005
	polymérom modifikovaný asfalt (PMA)	0,7	0,005
	gumoasfalt (RAC)	0,7	0,005
	studená zmes (CM)	0,7	0,005
	asfaltový koberec mastixový (SMA)	0,7	0,005
	asfaltový koberec drenážny (PA)	1,5	0,008
povrchová úprava (ST)	jednovrstvový náter (SBSD)	2,5	0,120
	dvojitvový náter (DBSD)	2,5	0,120
	náter s kalovým zákrytom (CAPE)	0,7	0,006
	asfaltový kal (SL)	0,7	0,006
	penetračný makadam (PM)	1,5	0,008

2.6.9.9 Šmykový odpor

Šmykový odpor sa modeluje parametrom SFC – súčiniteľom bočného šmykového trenia meraného zariadením SCRIM pri rýchlosti 50 ± 4 km/h (SFC_{50}).

Základná zmena (redukcia) hodnoty SFC_{50} závisí v modeli od ročného prírastku prejazdov úžitkových vozidiel:

$$\Delta SFC_{50} = K_{sfc} \cdot a_0 \cdot \max(0, \Delta QCV)$$

kde:

ΔQCV je ročný prírastok počtu úžitkových vozidiel [voz/(pruh.deň)],

K_{sfc} je kalibračný faktor pre šmykový odpor,

a_0 je faktor závislosti od typu povrchu vozovky (odporúčaná hodnota je $-0,663 \cdot 10^{-4}$).

Hodnota SFC_{50} na konci roka je daná súčtom hodnoty na začiatku roka a redukciou, avšak nie je menšia ako 0,35:

$$SFC_{50b} = \max(SFC_{50a} + \Delta SFC_{50}; 0,35)$$

kde:

SFC_{50b} je hodnota SFC_{50} na konci roka,

SFC_{50a} je hodnota SFC_{50} na začiatku roka,

ΔSFC_{50} je redukcia SFC_{50} počas roka počítaná vyššie.

Pre ďalšie analytické úlohy v HDM-4 sa počíta priemerná ročná hodnota ako aritmetický priemer hodnôt na začiatku roka a na konci roka:

$$SFC_{50av} = 0,5 \cdot (SFC_{50a} + SFC_{50b})$$

Priemerná hodnota šmykového odporu pri danej ročnej priemernej rýchlosti premávky SFC_s sa počíta ako:

$$SFC_s = K_{sfcs} \cdot \frac{SFC_{50av} \cdot (400 - (2 - \min(TD_{av}, 2) \cdot (\max(50, S) - 50)))}{400}$$

kde:

TD_{av} je priemerná ročná hĺbka textúry [mm],

S je priemerná cestová rýchlosť [km/h],

K_{sfcs} je kalibračný faktor pre účinky rýchlosti na šmykový odpor.

3 Algoritmizácia plánov údržby, opráv a rekonštrukcií na sieťovej úrovni

3.1 Ciele a hlavné úlohy sieťovej úrovne SHV

Fundamentálnym cieľom SHV je zabezpečiť požadovanú „kvalitu cestnej siete“ pri čo najhospodárnejšej prevádzke systému. Hospodárnosť systému je priamo úmerná priamej aj nepriamej spotrebe finančných prostriedkov. Kvalita cestnej siete má viacero rozmerov, avšak v princípe ide o zabezpečenie adekvátne bezpečnej a komfortnej dopravy, ku ktorým v posledných rokoch akcentuje aj ekologický rozmer.

Ako sme rozoberali podrobne v predchádzajúcej kapitole, vozovky časom degradujú vplyvom vonkajších degradačných faktorov, a preto je nevyhnutné na cestnej aplikovať dôsledne plánovanú údržbu, opravy a rekonštrukcie vozoviek.

Na najvyššej úrovni teda môžeme charakterizovať fundamentálne ciele SHV ako optimalizačnú úlohu:

$$\begin{aligned} \text{kvalita cestnej siete} &\rightarrow \max \\ \text{náklady} &\rightarrow \min \end{aligned}$$

V praxi sa údržba, oprava a rekonštrukcie vozoviek plánujú v ročných rozpočtových cykloch. Keďže finančné prostriedky potrebné na ich realizáciu sú veľmi vysoké, musia sa plánovať v dostatočnom predstihu tak, aby správca, resp. vlastník mal dosť času na ich zabezpečenie. Vyčíslenie potrebných finančných požiadaviek je prvou hlavnou úlohou sieťovej úrovne SHV.

Keďže len málokedy správca disponuje požadovaným objemom finančných prostriedkov, správca musí zabezpečiť čo najvhodnejšie rozdelenie rozpočtovaných prostriedkov na naplnenie cieľov SHV. Toto je druhá hlavná úloha sieťovej úrovne SHV.

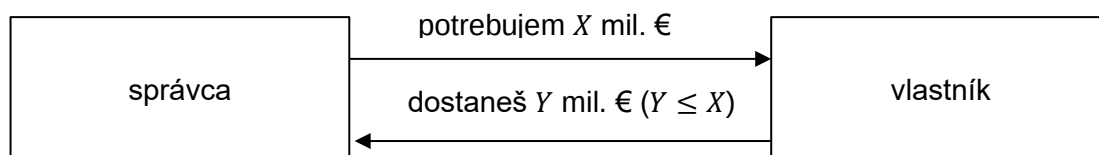
Dve hlavné úlohy sieťovej úrovne SHV sú teda:

1. vyčíslíť množstvo finančných prostriedkov potrebných na zabezpečenie kvality cestnej siete v dlhodobom časovom horizonte,
2. zostaviť čo najlepší plán ÚOR pre cestnú sieť pri danom rozpočte.

Obe úlohy sa súhrnne nazývajú aj *sieťové plánovanie ÚOR*.

Prvú úlohu je možné previesť na druhú úlohu pri podmienke rozpočtovo neobmedzeného plánu ÚOR. Množstvo potrebných financií je potom dané súčtom finančných nárokov jednotlivých úsekov na ÚOR. Prvú úlohu je možné riešiť aj inak (napríklad heuristikami agregovaných sumárov z jednotlivých úsekov), avšak za cenu vo všeobecnosti horších výsledkov, a preto iné riešenia nebudeme popisovať.

Vo väčšine krajín sú cesty verejné a spravované na to zriadenými organizáciami (správcami ciest). Správca cesty môže hospodáriť s vlastnými prostriedkami (získané napríklad z predaja diaľničných známok, úverov alebo podnikateľskou činnosťou) alebo s prostriedkami, ktoré mu prideli každoročne vlastníci. Potom riešenie týchto dvoch hlavných úloh je súčasťou nasledovnej interakcie medzi správcou a vlastníkom:



V nasledujúcom texte sú popísané najprv základné pojmy algoritmizácie sieťového plánovania SHV a potom niektoré algoritmické prístupy riešenia týchto dvoch hlavných úloh sieťovej úrovne SHV.

3.2 Základné pojmy plánovania ÚOR

3.2.1 Analyzované obdobie

Všetky algoritmy okrem tých najjednoduchších analyzujú potenciál realizácie ÚOR na vozovkách cestnej siete v časovom období viacerých rokoch. Dĺžku tohto časového obdobia budeme nazývať *dĺžka analyzovaného obdobia* alebo zjednodušene len *analyzované obdobie*.

Typická dĺžka analyzovaného obdobia na sieťovej úrovni je aspoň 5 rokov, často 10, 15 aj viac rokov.

3.2.2 Homogénny úsek

V zásade vstupom pre všetky popisované algoritmy sú *úseky cestnej siete*. Algoritmy priradujú každému vstupnému úseku pre každý rok analyzovaného obdobia niektorú z technológií (pozri ďalšiu podkapitolu).

Vzhľadom na to, že algoritmy berú do úvahy technický stav úseku a mnoho z nich aj ďalšie atribúty, ako je dopravné zaťaženie, konštrukcia vozovky a nepremenné technické parametre, je zrejmé, že vstupné úseky by mali byť konštruované tak, aby sa hodnoty týchto relevantných parametrov na celej dĺžke úseku nemenili alebo boli štatisticky veľmi podobné.

Takéto úseky nazývame *homogénnymi úsekmi*, pretože hodnoty ich relevantných atribútov sú na celej dĺžke rovnaké (homogénne).

Okrem podmienky homogenity hodnôt relevantných atribútov sa väčšinou kladie aj podmienka minimálnej dĺžky takýchto úsekov kvôli praktickým obmedzeniam technológií ÚOR. Väčšinou sa volia minimálne dĺžky 100 m [24], 200 m, 500 m a viac.

3.2.3 Technológie a katalóg technológií

Jednotlivé zásahy ÚOR, ktoré menia technický stav vozovky (a tým aj hodnoty premenných technických parametrov), budeme nazývať *technológie ÚOR* alebo skráteno *technológie*.

Celá množina technológií, s ktorou algoritmy pracujú aj s ich potrebnými atribútmi, sa nazýva *katalóg technológií*.

Všetky algoritmy potrebujú minimálne poznať jednotkovú cenu realizácie danej technológie. Cena je väčšinou daná na jednotku dĺžky (€/m) alebo plochy (€/m²).

Niektoré technológie majú obmedzenia vzhľadom na technický stav vozovky, za ktorého je možné alebo vhodné ich aplikovať. Tieto obmedzenia vyjadrujú v katalógu technológií tzv. *intervenčné* alebo *zásahové kritériá*.

Pri danom technickom stave homogénneho úseku povoľujeme možnosť realizácie aj viac ako jednej technológie.

Pre výpočet prínosov z realizácie danej technológie a v prípade viacročných algoritmov aj pre výpočet technického stavu v nasledujúcom roku po realizácii technológie potrebujeme poznať, ako realizácia technológie zmení technický stav vozovky. Toto je definované cez tzv. *dopadové pravidlá* alebo *resety*.

Z technických dôvodov uľahčenia popisu algoritmov a vzťahov zaradíme do katalógu technológií aj tzv. technológiu *bez zásahu* (angl. *do-nothing*), ktorú volíme, pokiaľ sa v niektorom roku nemá aplikovať žiadna iná technológia.

Vzhľadom na algoritmickú komplexnosť sieťového plánovania ÚOR by mal byť katalóg technológií vozoviek na sieťovej úrovni primerane jednoduchý (bežne do 10 technológií), napríklad pre asfaltové vozovky:

0. bez zásahu,
1. súvislá údržba – mikrokoberec,

2. oprava – výmena obrusnej vrstvy
3. oprava – výmena krytu,
4. zosilnenie novou vrstvou,
5. rekonštrukcia.

3.2.4 Stratégia (alternatíva) homogénneho úseku

Na danom homogénnom úseku v jednom roku na základe intervenčných pravidiel katalógu technológií môže byť prípustná na realizáciu viac ako jedna technológia. Tiež v prípade dlhšieho analyzovaného obdobia sa dá očakávať, že na jednom homogénnom úseku bude potrebné realizovať s časovým odstupom aj viac ako jednu technológiu ÚOR.

Postupnosť (vektor) $A = \{t_y\}_{y=1}^n$ o dĺžke n , kde t_y označuje niektorú z technológií v katalógu technológií a n je dĺžka analyzovaného obdobia, nazývame *stratégia* alebo *alternatíva (homogénneho) úseku*.

Ak algoritmus povoľuje len stratégie, kde okrem technológie „bez zásahu“ môže byť uvedená nanajvýš jedna iná technológia, nazývame takéto stratégie *jedno-aplikačné*. Pokiaľ môže byť v stratégii uvedená viac ako jedna technológia (iná ako technológia „bez zásahu“), potom ich nazývame *viac-aplikačné*.

Príklad viac-aplikačnej stratégie pre 10 ročné analyzované obdobie (0 je kód pre technológiu „bez zásahu“, 1, 2 a 5 sú kódy pre niektoré technológie ÚOR):

rok	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
techn.	0	0	5	0	0	0	0	1	0	2

3.2.5 Priame náklady realizácie ÚOR

Priame náklady vlastníka/správca danej stratégie homogénneho úseku predstavujú objem financií, ktoré znáša vlastník/správca na realizáciu všetkých navrhovaných technológií tejto stratégie počas celého analyzovaného obdobia.

Základné vyjadrenie priamych nákladov poskytuje tzv. *nákladový vektor* stratégie, čo je postupnosť priamych nákladov pre každý rok analyzovaného obdobia:

$$\vec{C} = (C_1, C_2, \dots, C_n)$$

kde n je dĺžka analyzovaného obdobia.

Jednotlivé komponenty získame násobením jednotkovej ceny z katalógu technológií a dĺžky/plochy homogénneho úseku.

V niektorých prípadoch potrebujeme pracovať s celkovou sumou priamych nákladov. Keďže jednotlivé financie sa spotrebúvajú v rôznych rokoch, pracujeme s diskontovanou sumou nákladov, ktorá transformuje budúce náklady na spoločnú časovú bázu:

$$C = \sum_{t=1}^n C_t \cdot \left(\frac{1}{1+d} \right)^t$$

kde d je spoločenská diskontná miera.

3.2.6 Prínosy z realizácie ÚOR

Základom všetkých pokročilejších algoritmov plánovania ÚOR na sieťovej úrovni je uvažovanie súvislosti medzi nákladmi a prínosmi, ktoré sa dosiahnu po realizácii ÚOR na úseku.

Prínosy môžeme počítať ako:

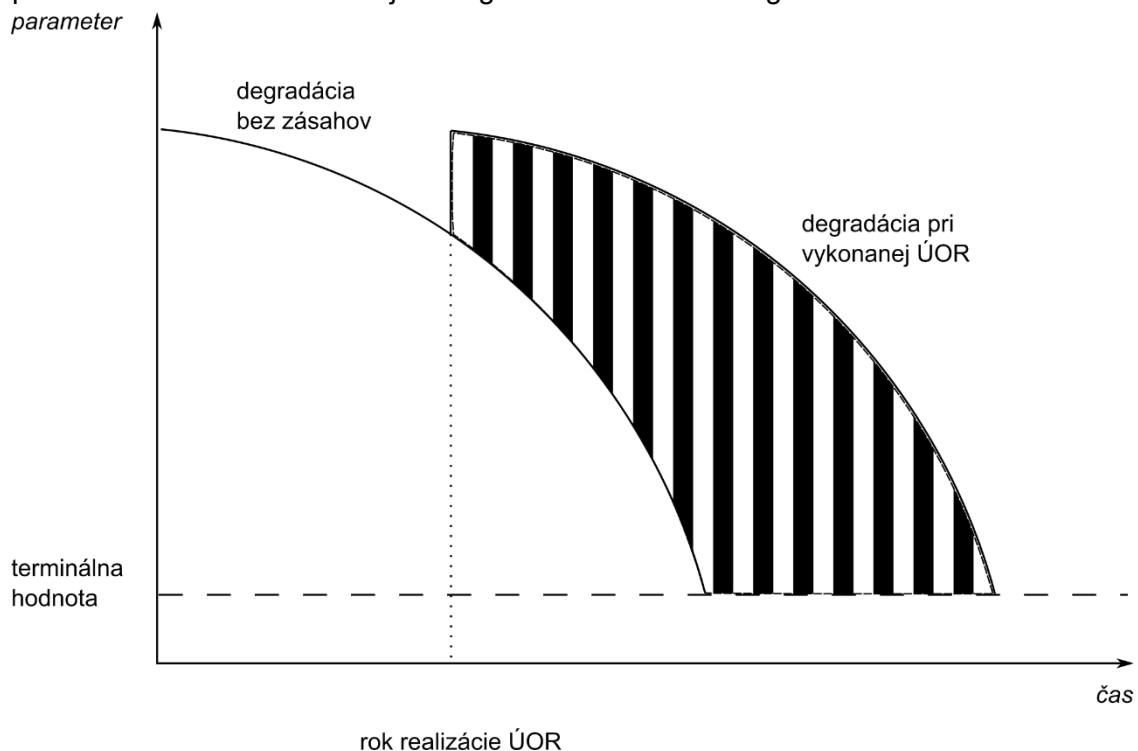
1. **technické prínosy** – ide o predĺženie životnosti vozovky na úseku zlepšením jej technického stavu vyjadreného rôznymi parametrami prevádzkovej spôsobilosti a výkonnosti, prípadne ich kombináciou,
2. **spoločenské prínosy** – ide o vyjadrenie zisku priamo pre spoločnosť, primárne používateľov (vodičov, pasažierov, prepravy tovaru), a to typicky vo forme skrátených cestových časov, znížením prevádzkových nákladov vozidiel, znížením dopravnej nehodovosti, znížením vypustených emisií a pod.

Prínosy môžeme vyjadrovať:

1. **v primárnych (prirodzených) jednotkách** – pri technických prínosoch ako napr. IRI priamo v mm/m, skrátený cestovný čas v hodinách, zníženú spotrebu paliva v litroch a pod.,
2. **v monetárnych jednotkách** – pre prínosy, pre ktoré primárne jednotky nie sú priamo peniaze, ide o prepočítanie na peňažné jednotky rôznymi prepočtovými vzťahmi. V monetárnych jednotkách nemôžeme vyjadrovať priamo technické prínosy.

Prínosy danej stratégie počítame v zásade ako rozdiel priebehu hodnôt vybraného parametra voči bazovému scenáru, ktorým býva pri plánovaní ÚOR na sieťovej úrovni stratégia bez zásahov, teda stratégia, v ktorej sa nerealizuje žiadna ÚOR.

Pokiaľ používame nemonetárny parameter na výpočet prínosov, potom si môžeme predstaviť získané prínosy ako plochu medzi krivkami vyjadrujúcimi vývoj tohto parametra za realizácie danej stratégie a základnou stratégiou bez zásahov:



Obrázok 12 Prínosy z realizovanej ÚOR

Na obrázku je realizovaný prínos šrafovaný.

Nemonetárne prínosy sa zvyknú násobiť ešte niektorými koeficientami, napr.:

- dopravný koeficient – násobenie RPDl alebo inou hodnotou úmernou dopravnému zaťaženiu – vyššie prínosy dosahujú viac dopravne zaťažené úseky,

- koeficient dopravného významu – vyššie prínosy dosahujú dopravné významnejšie úseky,
- dĺžka/plocha – dlhšie alebo väčšie úseky dosahujú vyššie prínosy.

Technické prínosy sú priamočiaro vypočítateľné z degradačného modelu a resetov jednotlivých technológií. Sú však pomerne abstraktné, je zložitá ich kombinovať vzájomne a majú ťažko interpretovateľný skutočný vplyv na vodičov a celú spoločnosť (aký je napríklad reálny vplyv zníženia IRI z 3 mm/m na 2 mm/m alebo z 2 mm/m na 1 mm/m?).

Tieto ťažkosti odstraňujú spoločenské prínosy; na druhej strane sa ale vyčísľujú oveľa zložitejšie.

Monetárne vyjadrené prínosové zložky je možné navyše ľahko kombinovať (sčítavať) a priamo dávať do súvisu s nákladmi na realizáciu stratégie ÚOR vo forme peňažného toku.

Benefity budeme označovať v ďalšom texte typicky písmenom B s rôznymi indexami.

Podobne ako priame náklady aj získané benefity z realizácie stratégie tvoria vektor prínosov získaných v jednotlivých rokoch:

$$\vec{B} = (B_1, B_2, \dots, B_n)$$

a pokiaľ sú vyjadrené v peňažných jednotkách, má zmysel uvažovať aj ich diskontovaný súčet:

$$B = \sum_{t=1}^n B_t \cdot \left(\frac{1}{1+d} \right)^t$$

V takomto prípade je tak nákladová, ako aj prínosová stránka, vyjadrená v rovnakých jednotkách a je možné hovoriť o tzv. čistých prínosoch ako rozdiely medzi (hrubými) prínosmi $\vec{B}$ a nákladmi $\vec{C}$.

Čistá súčasná hodnota NPV je potom súčet tohto diskontovaného peňažného toku:

$$NPV = \sum_{t=1}^n (B_t - C_t) \cdot \left(\frac{1}{1+d} \right)^t$$

Okrem čistej súčasnej hodnoty sa ako ďalší ekonomický parameter môže použiť vnútorná výnosová miera (IRR), čo je taká hodnota diskontnej miery d , pri ktorej je čistá súčasná hodnota 0:

$$\sum_{t=1}^n (B_t - C_t) \cdot \left(\frac{1}{1+d} \right)^t = 0$$

$$d = ?$$

Čistá súčasná hodnota priamo číselne vyjadruje veľkosť získaných prínosov z realizácie danej alternatívy, kým vnútorná výnosová miera indikuje profitabilitu tejto alternatívy.

3.2.7 Zostatková hodnota

Životnosť poslednej navrhutej technológie ÚOR (inej ako „bez zásahu“) v rámci stratégie homogénneho úseku môže presahovať posledný rok analyzovaného obdobia. Napríklad navrhovaná oprava alebo rekonštrukcia v posledných rokoch analyzovaného obdobia by nespravodlivo znevýhodnila takúto stratégiu pred inými stratégiami vďaka vyšším okamžitým nákladom a faktu, že prínosy stratégie sa počítajú len v rámci analyzovaného obdobia.

Preto do celkového posúdenia zahrňame tzv. *zostatkovú hodnotu na konci analyzovaného obdobia* (salvage value), ktorú počítame ako dosiahnuté prínosy od konca analyzovaného obdobia po koniec životnosti poslednej technológie v stratégii.

Takto vypočítanú zostatkovú hodnotu zahrnieme v prínosovej stránke projektu. Pokiaľ prínosy sú vyjadrené monetárne, pôjde o kladný príspevok do celkového peňažného toku stratégie.

Šrotovné je hodnota recyklovateľných materiálov, z ktorých je vozovka postavená, a to na úplnom konci jej životnosti. Je to teda teoretické množstvo peňazí, ktoré vlastník môže ešte získať z materiálov po kompletnom vybúraní vozovky. Šrotovné sa typicky určuje podielom stavebných nákladov každej vrstvy vozovky. Keďže tento podiel nebýva vysoký a diskontovanie na konci dlhého analyzovaného obdobia ho ešte výrazne zníži, uvažuje sa na sieťovej úrovni len málokedy.

3.3 Algoritmické prístupy

Nech k je počet uvažovaných technológií v katalógu technológií a n je dĺžka analyzovaného obdobia. Potom pre jeden úsek existuje teoreticky k^n alternatív.

Pri 5 technológiách v katalógu a 10-ročnom analyzovanom období to predstavuje takmer 10 miliónov rôznych alternatív pre jediný úsek. Tento počet ešte redukuje intervenčné pravidlá.

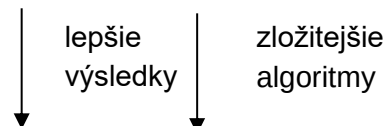
Ak by bola analyzovaná sieť rozdelená na m úsekov, potom existuje celkovo $(k^n)^m = k^{n \cdot m}$ rôznych plánov ÚOR na sieti, ktoré sa dajú zostaviť.

Uvažujme napríklad relatívne menšiu cestnú sieť o dĺžke 100 km, ktorá je rozdelená na 100 úsekov o dĺžke 1000 m (len pre ilustráciu). Znamená to, že sa dá zostaviť $5^{10 \cdot 100}$ rôznych plánov ÚOR, čo je približne 10^{698} možností. Táto kombinatorická explózia predstavuje vážny problém a znamená, že na zostavenie optimálnych plánov ÚOR sú potrebné sofistikované algoritmy.

Na riešenie týchto úloh sa používa viacero metód. Aj keď všetky určujú nejakým spôsobom „priority“, tzn. ktorý úsek sa dostane na rad skôr ako iný, vyčleňujeme metódy využívajúce matematickú optimalizáciu do samostatnej kategórie (*optimalizačné metódy*) od ostatných, ktoré majú určovanie priorít „natvrdo zakódované“ vo svojich algoritmoch (*prioritné metódy*).

Základné delenie algoritmických prístupov je:

- prioritné rankingové metódy,
- prioritné viacročné heuristické metódy,
- matematická optimalizácia.



V ďalšom texte tieto prístupy popíšeme bližšie.

3.4 Prioritné rankingové metódy

Rankingové metódy predstavujú implementačne najjednoduchší spôsob zostavovania plánov ÚOR, ktorý však na druhej strane poskytuje suboptimálne výsledky.

Podstata rankingových metód spočíva v každoročnom utriedení celého zoznamu úsekov na sieťovej úrovni na základe nejakého kritéria a priradenia vhodnej technológie ÚOR každému úseku v zozname nejakým spôsobom.

Finančná potreba pre daný rok je potom daná súčtom nákladov na vykonanie zvolených technológií ÚOR v rozsahu daných úsekov. Plán ÚOR pre daný rok pri zadanom rozpočte je potom zoznam úsekov „zhora dole“ v utriedenom zozname, až pokým kumulatívny súčet nákladov neprevýši objem disponibilných financií.

Vzhľadom na priamočiarosť tohto riešenia sú rankingové metódy väčšinou súčasťou prvých implementácií SHV u správcoch.

Je zrejmé, že rankingové metódy sa nedajú použiť pre viacročnú analýzu, čo je rozhodne ich nevýhoda. Nedokážu zohľadniť najvhodnejší čas pre realizáciu ÚOR na úseku a súčasne nevedia poskytnúť správcovi nástroj na viacročné plánovanie financií a ÚOR.

Na druhej strane sa ale dajú implementovať aj jednoduchou tabuľkou v Exceli a najhoršom prípade aj len s perom a ceruzkou.

Priradenie technológie ÚOR každému úseku aj samotné zotriedenie na základe „expertného odhadu“ správcu bez ďalších hlbších analýz už môže byť považované za ten najtriviálnejší ranking. Ide o čisto subjektívny spôsob, ktorý je akceptovateľný nanajvýš dočasne, kým sa nezavedú pokročilejšie spôsoby uvedené nižšie.

Nebudeme sa hlbšie zaoberať spôsobom, akým sa určuje vhodná technológia ÚOR pri rankingových metódach. Takmer vždy ide o nejakú formu aplikácie rozhodovacieho stromu alebo matice. Náklady na realizáciu takejto technológie na úseku sú potom dané súčinom jednotkových nákladov a rozmerov úseku vzhľadom na mernú jednotku jednotkových nákladov (dĺžka, plocha).

Čo ale odlišuje rankingové metódy navzájom, je použitie triediacich kľúčov pre získanie utriedeného zoznamu. Najčastejšie voľby sú nasledovné:

1. triedenie podľa jedného technického parametra (napr. IRI) od najhoršieho po najlepší (worst-first),
2. triedenie podľa zloženého technického indexu (napr. vážená kombinácia IRI, RUT) od najhoršieho po najlepší (worst-first),
3. triedenie podľa zloženého kľúča zahŕňajúceho okrem technických indexov aj iné ukazovatele, napríklad triedu dopravného zaťaženia (viac dopravou zaťažené úseky v približne rovnako technickom stave sú v zozname vyššie), dopravný význam cestného úseku a pod.,
4. triedenie podľa nákladov na realizáciu zvolenej technológie ÚOR,
5. triedenie podľa nákladov na realizáciu zvolenej technológie ÚOR a následných nákladov v rámci celého životného cyklu úseku,
6. triedenie podľa pomeru získaných prínosom k nákladom (benefit/cost).

Triedenia len podľa technického stavu vozovky (č. 1 a 2) sú jednoduché, ale nevhodné a neodporúčané. Ich výsledkom sa dostanú na rehabilitáciu najskôr úseky v najhoršom technickom stave bez ohľadu na iné kritériá, čo môžu byť v typickej sieti vozovky hlavne najnižších kategórií. Podobné výsledky dáva triedenie podľa nákladov (č. 4 a 5). Mierne lepšie výsledky poskytuje triedenie podľa technického stavu a ďalších kritérií zohľadňujúcich napr. dopravný význam úseku alebo dopravné zaťaženie (bod 3). Z pohľadu kvality výsledkov je najlepšia voľba triedenie podľa prínosovo-nákladového pomeru (č. 6), avšak je aj najnáročnejšia na dátové vstupy a bez špecializovaného softvéru aj výpočtovo zložitá.

Zložený triediaci kľúč (bod 3) je väčšinou vyvinutý deduktívnym spôsobom, ale niekedy sa používa empiricko-induktívny spôsob. Spočíva v priradení hodnoty rankingového indexu (teda relatívneho poradia) vzorke konkrétnych úsekov expertným panelom. Následne sa potom vytvorí štatistickou regresiou vzťah medzi atribútmi úsekov a rankingovým indexom. Takto odvodené vzťahy môžu byť relatívne komplikované, ako napríklad prioritný index z *Rational Factorial Rating Method* odvodeného v roku 1983 v Texase (vzťah uvádzame len pre ilustráciu; nemá pre nás praktický význam):

$$Y = 5,4 - 0,0263 \cdot X_1 - 0,0132 \cdot X_2 - 0,4 \cdot \log(X_3) + 0,748 \cdot X_4 + 1,66 \cdot X_5$$

(X_1 je množstvo ročných zrážok, X_2 je počet ročných cyklov zamrzania a rozmrzania, X_3 je RPD, X_4 a X_5 sú indexy technického stavu, Y je prioritný index od 1 (zlý stav) do 10 (výborný stav)). [25, p. 75]

Pre ilustráciu prioritného rankingu uvažujme jednoduchší príklad zloženého triedenia podľa technického stavu vyjadreného klasifikačnými stupňami IRI a RUT a triedy dopravného zaťaženia pre zoznam úsekov (bod 3):

úsek	kl. st. IRI	kl. st. RUT	trieda dopr. zať.
U1	5	5	II
U2	3	2	III
U3	4	2	II
U4	1	3	IV
U5	5	4	II
U6	5	5	III
U7	4	2	IV

Na zotriedenie zoznamu použijeme ilustračný dvojzložkový triediaci kľúč:

1. $2 \cdot kIRI + kRUT$ zostupne (kde $kIRI$ a $kRUT$ je klasifikačný stupeň IRI, resp. RUT),
2. v prípade zhody hodnoty v bode 1 sa triedi v rámci skupiny podľa triedy dopravného zaťaženia vzostupne.

Po priradení technológie ÚOR na základe nejakého rozhodovacieho stromu, spočítaní nákladov na realizáciu danej technológie a utriedení dostaneme zoznam v podobe:

úsek	kl. st. IRI	kl. st. RUT	trieda dopr. zať.	technológia	náklady	kumulatívne náklady
U1	5	5	II	T3	600 000 €	600 000 €
U6	5	5	III	T3	720 000 €	1 320 000 €
U5	5	4	II	T3	350 000 €	1 670 000 €
U3	4	2	II	T4	230 000 €	1 900 000 €
U7	4	2	IV	T1	450 000 €	2 350 000 €
U2	3	2	III	T2	230 000 €	2 580 000 €
U4	1	3	IV	T1	90 000 €	2 670 000 €

Celkový súčet nákladov je 2 670 000 €, čo je výška požadovaného finančného nároku na daný rok. Vzhľadom na to, že v prípade rankingových metód rozhodovacie stromy pre voľbu technológie volia typicky „najsilnejšiu“ možnú technológiu, pri teoretickej realizácii takéhoto plánu by všetky úseky boli ďalší rok boli v takmer bezchybnom stave a požadované náklady pre zabezpečenie celého plánu budú nereálne vysoké.

Vlastník nakoniec správcovi prideli nejaké množstvo financií, s ktorými bude môcť hospodáriť. Do plánu realizácie tak zaradi úseky zhora dole v tabuľke, na ktoré mu ešte ostatnú peniaze. Napríklad pri rozpočte 2 000 000 € by sa dostali do realizácie (do projektovej úrovne SHV) úseky po hrubú čiaru v tabuľke.

Rankingové metódy sú jednoduché a vyžadujú pomerne málo vstupných informácií, avšak ich výsledky majú ďaleko od optimálnych. Zohľadňujú len stav v aktuálnom roku, neposudzujú možnosti odloženia ÚOR na úsekoch do ďalších rokov, nezohľadňujú celý životný cyklus úseku ani možnosti viacerých alternatív ÚOR pre daný rok. Triedenie zoznamu je väčšinou založené len na základe technického stavu vozovky alebo

vážených vzorcoch a nezohľadňuje komplexné ekonomické hodnotenie spoločenských prínosov voči nákladom.

3.5 Viacročné heuristické prioritné metódy

Úlohou viacročných prioritných algoritmov je pripravovať finančné plány a zostavovať plány ÚOR pri zohľadňovaní času (roku) realizácie ÚOR na úsekoch. Tento fakt predstavuje podstatný rozdiel medzi týmito algoritmami a vyššie spomenutými rankingovými metódami. Implementácia takýchto metód vyžaduje už prípravu degradačných modelov a v praxi takmer vždy aj komplexnejšie rozhodovacie pravidlá pre voľbu technológie a komplexnejšie ekonomické modely na vyhodnotenie prínosov medzi navrhovanými riešeniami.

Viacročné prioritné metódy využívajú na riešenie problému zostavovania plánu ÚOR špecifické heuristické metódy. Dve najčastejšie používané metódy sú :

1. metóda marginálnej nákladovej efektivity (MCE) a
2. analýza inkrementálnych nákladov a benefitov (IBC),

ktoré sú popísané bližšie v nasledujúcich kapitolách. Vychádzajú zo všeobecných ekonomických metód typu *vyzývateľ-obranca*, pri ktorých heuristika zvažuje, či je možné za nejakých podmienok nahradiť jedno rozhodnutie (obranca) iným, výhodnejším rozhodnutím (vyzývateľ).

Obe metódy počítajú s enumeráciou všetkých možných alternatív pre každý úsek, ale väčšej kombinatorickej explózie sa vyhýbajú tým, že neporovnávajú priamo všetky alternatívy všetkých úsekov vzájomne. Avšak pri katalógu technológií, ktorý dáva veľa možností na voľbu technológie pre daný rok a príliš dlhom analyzovanom období, majú tieto metódy ťažkosti s kombinatorickou explóziou.

V praxi sa pri týchto metódach na výpočet benefitov využíva väčšinou nejaký druh kompozitného technického indexu, podľa ktorého sa aj volia návrhy technológií. Korektný kompozitný index je náročné pripraviť tak, aby bolo možné podľa neho voliť vhodné technológie. MCE aj IBC sa snažia maximalizovať efektivitu vyjadrenú takýmto indexom, a preto majú tendenciu voliť nákladnejšie technológie, ako opravy a rekonštrukcie, výsledkom ktorých je väčšia získaná plocha pod krivkou indexu.

3.5.1 Analýza marginálnej nákladovej efektivity (MCE)

Analýza marginálnej nákladovej efektivity má svoj pôvod vo všeobecných ekonomických metódach a jej princíp spočíva najprv vo výbere stratégie s najvyšším podielom efektivity (prínosov) voči nákladom a následne postupným kladením otázky, či už vybrané stratégie môžeme nahradiť za zvyšné (odpoveď je kladná, pokiaľ prinášajú viac absolútnych prínosov a súčasne viac pridaných jednotkových prínosov). V prípade rozpočtovo obmedzeného scenáru sa postup opakuje, kým nie sú vyčerpané všetky prostriedky.

Metóda môže pracovať v režime jedno-aplikačných, aj viac-aplikačných stratégií.

MCE bola istú dobu veľmi populárna a hojne využívaná metóda (a pravdepodobne u mnohých implementácií SHV stále je).

Vstupom do algoritmu je enumerácia všetkých možných stratégií pre všetky uvažované homogénne úseky siete, ich náklady v súčasných cenách (C) a vypočítaná efektivita (E) a rozpočet.

Ako efektivita stratégie sa takmer vždy používa prínos vyjadrený cez plochu výkonnostnej krivky na úseku pri predpoklade aplikácie tejto stratégie nad kritickou hranicou počas návrhového obdobia, vážený dĺžkou alebo plochou úseku a RPDI. Technicky plocha nad kritickou hranicou je kladná a pod ňou záporná (odoberá prínosy).

$$\text{Efektivita} = l \cdot \int_0^n f(t) \cdot \text{RPDI}(t) dt$$

kde l je dĺžka úseku, n je dĺžka analyzovaného obdobia, $f(t)$ je priebeh výkonnostnej funkcie (technického parametra) pri aplikácii stratégie (bez ujmy na všeobecnosti nech kritická hranica je zhodná s osou x) a $RPDI(t)$ je funkcia okamžitej RPDÍ. V praxi sa, samozrejme, využíva diskretný variant sumujúci cez celé roky návrhového obdobia.

Postup je potom nasledovný:

1. pre každú stratégiu spočítaj podiel $CE := \frac{E}{C}$ (tzv. nákladová efektivita) a ulož si pre každú stratégiu výsledok do premennej MCE ,
2. opakuj pokiaľ nemáš eliminované všetky stratégie alebo nie je vyčerpaný rozpočet:
 - a. nájdi stratégiu s najväčším MCE ; nech je to stratégia na úseku U a označme ju S ,
 - b. ak sa stratégia nezmestí do rozpočtu (pri nahradení už inej vybratej stratégie na úseku U treba uvažovať s vrátením prostriedkov vybratej stratégie do rozpočtu), eliminuj túto stratégiu a vráť sa na začiatok cyklu,
 - c. označ túto stratégiu ako vybratú pre úsek U ; pokiaľ už bola na úseku U vybratá iná, tak túto eliminuj,
 - d. pre každú zvyšnú neeliminovanú stratégiu R na úseku U spočítaj marginálnu nákladovú efektivitu v porovnaní so stratégiou S : $MCE := \frac{E_R - E_S}{C_R - C_S}$, kde E_R a E_S je efektivita stratégie R , resp. S a C_R a C_S sú náklady stratégie R , resp. S .
 - i. ak $E_R - E_S < 0$ alebo $MCE < 0$, potom táto stratégia neprináša v porovnaní už s vybratou pridanú hodnotu a eliminuj ju.

Výstupom na konci sú stratégie, ktoré ostali označené ako vybraté.

Nasledujúci príklad použitia metódy MCE je adaptovaný z interných školiacich materiálov americkej FHWA. Na troch úsekoch A, B a C boli navrhnuté 4, 3 a 3 stratégie s technológiami T1 až T6. Úlohou je vybrať najlepšie alternatívy pre rozpočet 12 peňažných jednotiek. V stĺpci CE je uvedená nákladová efektivita každej alternatívy. Ďalej sú v stĺpcoch MCE vyplnené medzivýsledky sprava doľava tak, ako algoritmus prebiehal. Je v nich uvedené, že daná alternatíva bola vybratá alebo hodnota marginálnej nákladovej efektivity neeliminovaných alternatív voči vybratej. Pokiaľ alternatíva bola eliminovaná kvôli nesplneniu podmienky zvýšenia efektivity voči vybratej alternatíve, je uvedená jedna hviezdička. Pokiaľ alternatíva bola eliminovaná kvôli prekročeniu rozpočtu, sú uvedené dve hviezdičky.

Algoritmus nakoniec vybral na úseku A alternatívu 3, na úseku B alternatívu 2 a na úseku C alternatívu 1, spolu s nákladmi 11 jednotiek (teda nevyužil 1 peňažnú jednotku z disponibilného rozpočtu).

Úsek	Alt.	Techn.	Efektivita	Náklady	CE	MCE	MCE	MCE	MCE	MCE	Finále
A	1	T1	1	1	1,0	1,0	*	*	*	*	*
	2	T2	5	2	2,5	2,5	Vybrať	Vybrať	*	*	*
	3	T3	8	4	2,0	2,0	1,5	1,5	Vybrať	Vybrať	Vybrať
	4	T4	11	8	1,4	1,4	1	1,0	0,8	0,8	**
B	1	T2	8	4	2,0	2,0	2,0	Vybrať	Vybrať	*	*
	2	T3	10	6	1,7	1,7	1,7	1,0	1,0	Vybrať	Vybrať
	3	T4	11	8	1,4	1,4	1,4	0,8	0,8	0,5	**
C	1	T5	3	1	3,0	Vybrať	Vybrať	Vybrať	Vybrať	Vybrať	Vybrať
	2	T6	5	4	1,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	**
	3	T3	10	6	1,7	1,4	1,4	1,4	1,4	**	**
Použité						1	3	7	9	11	
Voľné						11	9	5	3	1	

3.5.2 Metóda inkrementálnych prínosov a nákladov (IBC)

Metóda inkrementálnych prínosov a nákladov (*IBC – Incremental Benefit-Cost*) pre výber stratégií ÚOR vozoviek na sieťovej úrovni bola vyvinutá v rámci výskumu pod vedením Dr. Shahina pre americké letecké prepravné úradníctvo pre svoj systém hospodárenia s vozovkami PAVER [26], ale jej základy postavil Dr. Frank McFarland z Texaskej univerzity koncom 70. rokov pre výber projektov znižujúcich dopravnú nehodovosť. Odvtedy túto metódu prebralo veľmi veľa ďalších systémov.

Cieľom tejto heuristickej metódy je vybrať také stratégie ÚOR, ktoré maximalizujú čisté prínosy pre daný rozpočet.

Najskôr sa pre každý úsek usporiadajú vzostupne stratégie podľa nákladov a spočíta sa pomer $IBC = \Delta B / \Delta C$, teda koľko ďalších prínosov za každé ďalšie investované euro prinesie nasledujúca drahšia stratégia. Drahšie stratégie prinášajúce nižšie prínosy sa neuvažujú. Pre ďalší krok sa zaistí, aby postupnosti *IBC* na každom úseku boli klesajúce (budú tvoriť na grafe s nákladmi na osi x a prínosmi na osi y konkávnu lomenú čiaru – tzv. *hranicu efektivity*, keďže hodnoty *IBC* medzi dvomi stratégiami sú vlastne smernice úsečiek, ktoré ich spájajú). Následne sa postupne vyberajú stratégie v usporiadanom zozname podľa *IBC* zostupne. Keďže všetky zvažované stratégie sledujú na konkrétnom úseku v poradí od najlacnejšej po najdrahšiu klesajúcu postupnosť, pre daný úsek sa ako prvá stratégia volí vždy tá najlacnejšia a jej *IBC* vyjadruje prostý pomer prínosov k nákladom. Pre následne uvažované stratégie pre tento úsek už bude *IBC* vyjadrovať zvýšené prínosy na jednotkové náklady.

Pôvodný algoritmus počíta s tým, že vektory jednotlivých stratégií nie sú rovnako dlhé, teda môžu byť navrhnuté na rôznu dĺžku analyzovaného obdobia. Aby ich bolo možné vzájomne porovnávať, na ocenenie nákladovej stránky sa používajú *ekvivalentné uniformné ročné náklady* (EUAC), pri ktorých sa uvažuje s anuitnou spotrebou nákladov počas fixného analyzovaného obdobia (stratégie kratšie ako dĺžka analyzovaného obdobia sa doplnia sprava potrebným počtom kópií postupnosti vektora stratégie):

$$EUAC = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot \sum_{t=0}^n C_t \cdot \left(\frac{1+r}{1+i} \right)^t$$

kde C_t sú náklady v roku t (C_0 sú počiatočné náklady), n je dĺžka analyzovaného obdobia v rokoch, i je diskontná úroková miera a r je miera inflácie. (Čisto technicky v popise algoritmu majú vektory stratégie dĺžku $n + 1$, pretože počiatočné náklady majú zvláštny

význam pri tvorbe rozpočtovo obmedzeného plánu.) Ľavý činiteľ je vlastne súčiniteľ kapitálovej obnovy a pravý činiteľ sú diskontované náklady na realizáciu stratégie.

Prínosy môžu byť v zásade počítané ľubovoľne (pozri diskusiu vyššie), ale v čase vývoja metódy IBC ešte neboli vypracované metodiky na výpočet prínosov v monetárnych jednotkách, a preto pôvodný návrh algoritmu pracuje s rovnakým uvažovaním plôch pod výkonnostnými krivkami, ako všeobecná implementácia analýzy MCE (násobená tzv. *utilitou* odstraňujúcou potenciálne rôzne skutočné prínosy medzi stratégiami majúcimi rovnakú plochu pod výkonnostnou krivkou a *relatívnym súčiniteľom váhy*, ktorý preferuje dopravne významnejšie úseky).

Kvôli porovnaniu prínosov voči nákladom sa musia rovnako prínosy prepočítavať na ročné prínosy, a to vydelením počtom rokov, za ktorý úsek zdegraduje na kritickú hranicu (lineárna metóda) alebo vynásobením súčiniteľom kapitálovej obnovy ako pri výpočte nákladov (kapitalizované prínosy). Tieto cvičenia sú potrebné znova robiť len vtedy, keď sa uvažujú stratégie o rôznych počtoch rokov.

Vstupy: enumerácia všetkých možných stratégií pre všetky uvažované homogénne úseky siete, ich EUAC a ročné benefity a pri rozpočtovom obmedzení aj náklady v počiatočnom roku a rozpočet v počiatočnom roku.

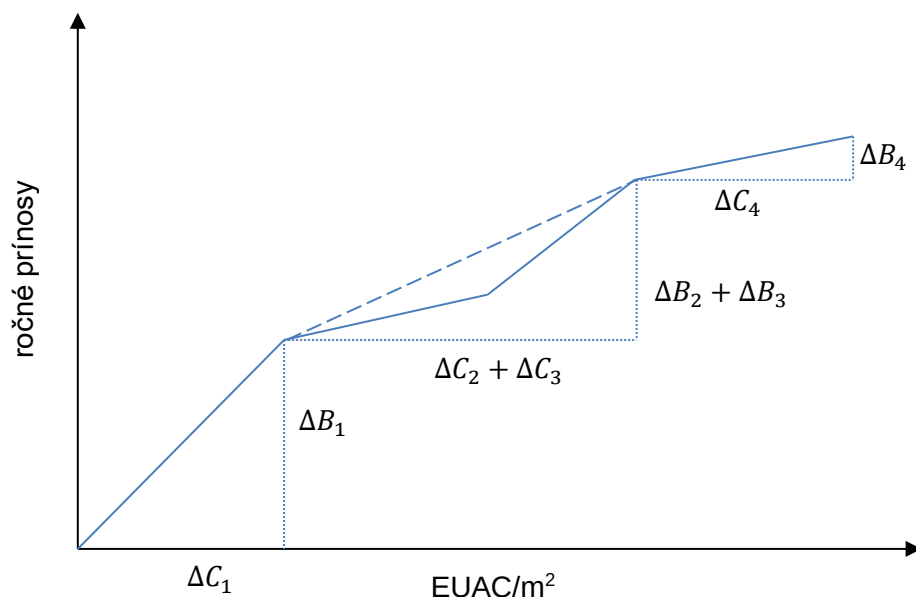
Algoritmus je nasledovný:

1. pre každý úsek utriedť stratégie podľa (jednotkových) EUAC na m² plochy vzostupne,
2. pre každý úsek spočítaj v utriedenom zozname stratégií tzv. inkrementálny pomer medzi prínosmi a nákladmi (IBC) ako $\frac{B_i - B_{i-1}}{C_i - C_{i-1}}$, kde i je poradové číslo stratégie v zozname, B_i a C_i sú prínosy, resp. náklady stratégie s číslom i , pričom pre prvú stratégiu sa berie $B_0 = 0$ a $C_0 = 0$,
3. eliminuj všetky stratégie s $IBC < 0$ (nákladnejšie stratégie prinášajúce menej prínosov; smernica je záporná),
4. vysporiadanie sa s neklesajúcou postupnosťou IBC na úseku:
 - a. nech S_1 a S_2 sú za sebou idúce stratégie a ich IBC sú $IBC_1 = \Delta B_1 / \Delta C_1$ a $IBC_2 = \Delta B_2 / \Delta C_2$. Pokiaľ $IBC_1 < IBC_2$, potom virtuálne zlúčime tieto dve stratégie tak, že stratégiu S_2 prisúdime ako IBC hodnotu $\frac{\Delta B_1 + \Delta B_2}{\Delta C_1 + \Delta C_2}$. Vo finálnej iterácii (bod 6) sa uvažujú obe stratégie,
5. usporiadať všetky neeliminované stratégie podľa IBC zostupne bez ohľadu na úsek,
6. pokým kumulatívny súčet *počiatočných* nákladov je menší ako rozpočet v *počiatočnom roku*, tak prechádzaj zoznam zhora dole; nech sa uvažuje aktuálna stratégia S na úseku U :
 - a. ak nebola ešte označená ako vybratá ešte žiadna iná stratégia na úseku U , tak označ S ako vybratú,
 - b. pokiaľ bola vybratá na úseku U už iná stratégia S' , potom ak prínosy stratégie S sú vyššie ako tie zo stratégie S' , tak označ stratégiu S ako vybratú,
 - c. pokiaľ stratégia S je zlúčenou stratégiou a nezmestí sa do rozpočtu, pokračuj ďalej (je možné, že sa zmestí jej lacnejšia dvojčka s nižším IBC).

Táto metóda môže produkovať takmer optimálne výsledky, avšak existujú okolnosti, pri ktorých to tak nie je (pozri napr. [27]).

Algoritmus nevie v popísanom variante uvažovať rozpočtové limity na viacročné obdobie, ani viac ako jeden typ rozpočtovej kapitoly (napr. zvlášť rozpočet pre bežné a zvlášť pre kapitálové prostriedky). Je možné ho síce priamočiaro rozšíriť, avšak kvalita heuristiky sa dosť zníži. Nie je ani možné optimalizovať vzhľadom na neaditívne počítané prínosy (napr. maximalizácia priemeru IRI celej siete).

Metódu IBC je možné použiť aj na projektovej úrovni pre výber najlepšej alternatívy, kde za predpokladu vyjadrenia prínosov v monetárnych jednotkách pri dodatočnej podmienke $IBC > 1$, je ekvivalentná výberu alternatívy s najvyššou čistou súčasnou hodnotou.



Obrázok 13 Nekónkávna situácia na grafe stratégií pri IBC analýze na úseku

3.6 Optimalizačné metódy

Metódy matematickej optimalizácie predstavujú vyššiu formu riešenia sieťového plánovania ÚOR. Využívajú desiatkami rokov vyvíjaný bohatý matematický a algoritmizačný aparát.

Vo všeobecnosti ide o formuláciu problému plánovania sieťovej úrovne SHV v jazyku matematickej optimalizácie a využitia všeobecných algoritmov na riešenie takéhoto druhu problémov. Algoritmy optimalizácie netriedia zoznamy stratégií úsekov a neudávajú ich priority ako také, ale hľadajú riešenia, ktoré najlepšie naplňajú ciele optimalizačných funkcií celkovo.

V závislosti od konkrétnej formulácie úlohy môže existovať algoritmus na exaktné riešenie danej úlohy v prakticky reálnom (polynomiálnom) čase, ale aj nemusí. V takom prípade sa uplatňujú rôzne sofistikované heuristické algoritmy riešenia matematickej optimalizácie.² Aj takom riešení bývajú výsledky väčšinou lepšie ako pri použití heuristických prioritných metód.

Veľká výhoda týchto metód je vysoká flexibilita konštrukcie zadania a možnosť riešenia mnohých variácií problému plánovania ÚOR na sieťovej úrovni. Môžeme hľadať riešenia s rozpočtovými obmedzeniami či bez nich, optimalizovať súčasne na náklady, technický

² Nemýľme si *heuristické prioritné metódy/algoritmy pre problém plánovania ÚOR na sieťovej úrovni* (špecifické heuristiky šité na mieru tomuto problému) prezentované v predchádzajúcej kapitole a *heuristické metódy/algoritmy riešenia všeobecných problémov matematickej optimalizácie* spomínaných tu.

stav, spoločenské prínosy a ďalšie či len niektoré z nich, môžeme klásť rôzne podmienky na tvar stratégií alebo ich aplikáciu a pod.

Všeobecné zadanie úlohy matematickej optimalizácie vyzerá nasledovne:

$$\begin{aligned} f_m(x) &\rightarrow \min/\max, m = 1, 2, \dots, M \\ g_j(x) &\geq 0, j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) &= 0, k = 1, 2, \dots, K \\ x_{l,i} &\leq x_i \leq x_{u,i}, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Funkcie $f_m(x)$ sa nazývajú *cieľové funkcie*, x je vektor rozhodovacích premenných, funkcie $g_j(x)$ a $h_k(x)$ sú *ohraničujúce funkcie* a $x_{l,i}$ a $x_{u,i}$ sú *hranice rozhodovacích premenných* vymedzujúce priestor rozhodovacích premenných.

Pri matematickej optimalizácii teda hľadáme také vektory $\bar{x}$ z priestoru rozhodovacích premenných, ktoré minimalizujú alebo maximalizujú hodnoty cieľových funkcií, pričom budú spĺňať podmienky nerovností a rovností ohraničujúcich funkcií.

Pokiaľ všetky cieľové aj ohraničujúce funkcie sú lineárne, hovoríme o *lineárnej optimalizácii* (z historických dôvodov nazývanej aj *lineárne programovanie*), inak ide o *nelineárnu optimalizáciu*.

Ak $J = 0$ a $K = 0$, potom ide o *neohraničenú optimalizáciu*.

Ak $M > 1$, hovoríme o *viackriteriálnej optimalizácii*. Všimnime si, že v tomto prípade nie je vôbec triviálne pre dva rôzne vektory $\bar{x}_1$ a $\bar{x}_2$ v každom prípade už ani povedať, ktorý z nich „lepší“ napĺňa kritériá minimalizácie/maximalizácie cieľových funkcií.

Ak priestor rozhodovacích premenných je spojitý (rozhodovacie premenné môžu nadobúdať napr. hodnoty na intervale reálnych čísel), potom hovoríme o *spojitej optimalizácii*. Ak premenné môžu nadobúdať len diskrétne hodnoty, nazývame úlohu *diskrétnou optimalizáciou* (niekedy aj *celočíselným programovaním*) a premenné budeme označovať veľkými písmenami X_i . Pokiaľ diskrétny rozhodovací priestor je len množina $\{0,1\}$, ide o tzv. *binárnu optimalizáciu*.

Z hľadiska náročnosti riešiteľnosti optimalizačnej úlohy sú lineárne optimalizácie ľahšie ako nelineárne, neohraničené ľahšie ako ohraničené, jednokriteriálne ľahšie ako viackriteriálne a spojitý ľahšie ako diskrétny.

Problém hľadania sieťového plánu ÚOR, ktorý maximalizuje benefity pri rozpočtovom obmedzení v jazyku matematickej formulácie bude zapísaný takto:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot B_{ij} &\rightarrow \max, \\ \sum_{j \in A_i} X_{ij} &\leq 1, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot \vec{C}_{ij} &\leq \vec{CC}, \end{aligned}$$

kde:

X_{ij} je binárna rozhodovacia premenná označujúca, či alternatíva j na úseku i bude vybratá do výsledného plánu ÚOR (hodnota 1) alebo nie (hodnota 0),

A_i je množina všetkých uvažovaných stratégií na úseku i ,

B_{ij} je súčasná hodnota prínosov stratégie j na úseku i ,

$\vec{C}_{ij}$ je nákladový vektor stratégie j na úseku i a

$\vec{CC}$ je rozpočtový vektor plánu ÚOR.

Pokiaľ máme k dispozícii viackriteriálny solver, môžeme pridať dodatočný cieľ minimalizácie celkových priamych nákladov:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot C_{ij} \rightarrow \min$$

kde navyše:

C_{ij} je súčasná hodnota nákladov na realizáciu stratégie j na úseku i .

Všeobecná formulácia problému plánovania rozpočtu s cieľom zabezpečiť kvalitu siete (štandard) vyzerá nasledovne:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot C_{ij} &\rightarrow \min, \\ \sum_{j \in A_i} X_{ij} &\leq 1, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot q(i, j) &\leq \vec{Q}, \end{aligned}$$

kde okrem symbolov v predošlom prípade sú navyše:

C_{ij} je súčasná hodnota nákladov na realizáciu stratégie j na úseku i ,

$q(i, j)$ je funkcia kvality, ktorá priradzuje stratégii j na úseku i vektor kvality,

$\vec{Q}$ je vektor hraničných hodnôt jednotlivých komponentov kvality.

V praxi potrebujeme často aj zabezpečovať, aby niektoré úseky spĺňali istú minimálnu úroveň z hľadiska technickej kvality, a to bez ohľadu na skutočne získané benefity (napr. nemôžeme dopustiť, aby nejaký málo vyťažovaný úsek diaľnice zdegradoval pod istý štandard, hoci z hľadiska získaných benefitov pri danom rozpočte by bolo vhodnejšie opraviť alebo zrekonštruovať nejaký úsek vyťaženejšej cesty II. triedy). Z tohto dôvodu vkladáme dodatočnú podmienku na minimálnu úroveň kvality pri rozpočtovo obmedzenom scenári.

Flexibilita matematickej optimalizácie nám umožňuje využiť plánovať aj vzhľadom na ďalšie programové ciele. Napríklad politikou cestného hospodárstva môže byť určené, že do 10 rokov musí byť dĺžkovo vážená hodnota IRI celej cestnej siete najviac na zadanej úrovni. Jednoducho doplníme ďalšie ohraničenie:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} \text{len}(i) \cdot X_{ij} \cdot \text{IRI}(i, j, n)}{\sum_{i=1}^m \text{len}(i)} \geq \text{IRI}_g$$

kde:

$\text{len}(i)$ je dĺžka úseku i ,

$\text{IRI}(i, j, n)$ je hodnota IRI v roku n na úseku i pri realizácii stratégie j ,

IRI_g je cieľová hodnota IRI na konci analyzovaného obdobia o dĺžke n .

Po sformulovaní problému v jazyku matematickej optimalizácie je potrebné pripraviť všetky vstupy, ktoré sa odovzdajú tzv. solveru.

Solver je softvér, ktorého úlohou je zadaný problém matematickej optimalizácie na daných vstupoch vyriešiť, teda nájsť hodnoty rozhodovacích premenných najlepšie naplňajúcich cieľové funkcie a rešpektujúce všetky ohraničenia.

Uvedené problémy sieťovej optimalizácie je možné riešiť všeobecným lineárnym solverom za predpokladu, že analyzovaná sieť je malá, katalóg technológií nepredpisuje vo všeobecnosti príliš veľa technológií pre daný stav úseku a analyzované obdobie nie je dlhé. Pri splnení týchto podmienok je totižto možné enumerovať všetky stratégie každého úseku a dopredu spočítať náklady a benefity, čím naplníme podmienky lineárneho binárneho rozhodovacieho problému. Konkrétne hodnoty, čo je považované za príliš veľa alebo málo, závisia od kvality solvera a dostupného výpočtového výkonu,

ale počet analyzovaných úsekov môže byť maximálne v stovkách, počet priemerne generovaných technológií malé jednotky a analyzované obdobia niekoľko pár rokov.

Tieto obmedzenia pre lineárny solver sú príliš striktné pre použité na dlhodobé sieťové plánovanie ÚOR na cestnej sieti v podmienkach SR.

Pri implementácii bude preto potrebné vyvinúť vlastný heuristický solver.

3.7 Príklady prakticky využívaných algoritmov sieťového plánovania ÚOR

V tejto kapitole sú popísané pre ukážku prístupy k sieťovému plánovaniu používané v praxi.

3.7.1 ILLINET (Illinois, USA)

Vývoj SHV pre medzištátnu diaľničnú sieť spravovanú ministerstvom dopravy v americkom štáte Illinois s názvom ILLINET siaha do 80. rokov. Rieši obidva základné problémy sieťového plánovania ÚOR (aký je optimálny plán ÚOR pre daný rozpočet a aké sú minimálne prostriedky potrebné na udržanie siete v želanom stave). Dĺžkou je táto sieť porovnateľná s dĺžkou ciest I. triedy na Slovensku.

Degradačný model modeluje 5 porúch na vystužených CB doskách (JRCP), 1 poruchu na spojitom vystužených CB vozovkách (CRCP) a 2 poruchy (reflexné trhliny a hĺbka koľají) na CB vozovke s dodatočným asfaltovým krytom. [6]

Základom hodnotenia a rozhodovacieho systému pre návrh ÚOR je tzv. *index stavu* (condition index – CS), počítaný ako funkcia výskytu jednotlivých porúch. Napríklad pre AB kryt na CB je v tvare [28]:

$$CRS = 9 - c_1 \cdot NCRACK - c_2 \cdot RUT$$

kde:

$NCRACK$ je počet rozvinutých priečných reflexných trhlín na 1 míľu,

RUT je priemerná hĺbka vyjazdených koľají [palce],

c_1, c_2 sú empiricky určené koeficienty.

Jednotkové ceny sú určené na pruho-míľu a používa sa 5 základných technológií ÚOR (bežná údržba, oprava betónových povrchov, prekrytie AB v hrúbke 3 palce, prekrytie AB v hrúbke 5 palcov, rekonštrukcia CRCP v hrúbke 10 palcov).

Používajú sa tri algoritmy plánovania: worst-first ranking na báze CRS, ranking podľa pomeru prínosov k nákladom a metóda inkrementálnych prínosov a nákladov (IBC).

3.7.2 GIS-ILLINET 2.0 (Illinois, USA)

Použitý degradačný model je uvedený v kap. 2.6.4.

Katalóg technológií obsahuje 5 technológií (údržba, patching, nový AC kryt v hrúbke 3-3/4 palca, nový AC kryt v hrúbke 5 palcov, rekonštrukcia). Pre každú technológiu a typ konštrukcie vozovky sa uvádza jednoznačné mapovanie vzhľadom na hodnotu indexu CRS. Interval medzi patchingom sú 5 ročné.

Použitý algoritmus sa nazýva *weighted benefit ranking algorithm* (WBRA) a v zásade ide o jednoduchý prioritný ranking podľa vážených benefitov, opakovaný pre každý rok analyzovaného obdobia. [17]

Pre výpočet benefitov sa využíva benefit v CRS, IRI a RUT (len asfaltové vozovky):

$$\begin{aligned}Benefit_{CRS} &= \log\left(\frac{RPDI}{PočetPruhov}\right) \cdot (9,0 - CRS) \\Benefit_{IRI} &= \log\left(\frac{RPDI}{PočetPruhov}\right) \cdot (IRI - 50) \\Benefit_{RUT} &= \log\left(\frac{RPDI}{PočetPruhov}\right) \cdot RUT\end{aligned}$$

Pripomíname že IRI, ako aj RUT, používajú anglosaské jednotky.

Celkový benefit sa počíta pre asfaltové vozovky ako:

$$OverallBenefit = 0,5 \cdot \frac{Benefit_{CRS}}{a} + 0,25 \cdot \frac{Benefit_{IRI}}{b} + 0,25 \cdot \frac{Benefit_{RUT}}{c}$$

a pre betónové:

$$OverallBenefit = 0,5 \cdot \frac{Benefit_{CRS}}{a} + 0,5 \cdot \frac{Benefit_{IRI}}{b}$$

Konštanty a, b, c sa zvolili tak, aby vozovka, ktorá potrebuje nejakú formu rehabilitácie, mala celkový benefit vyšší ako 1,0.

3.7.3 HDM-4

HDM-4 poskytuje pre sieťovú úroveň tzv. strategickú a programovú analýzu. Strategická analýza pracuje nad zjednodušenými reprezentatívnymi úsekmi, kým programová analýza pracuje nad konkrétnymi homogénnymi úsekmi analyzovanej siete.

HDM-4 neposkytuje skutočnú optimalizáciu, pretože posudzuje len používateľom vybrané alternatívy na úsekoch, a nie všetky možné alternatívy tak, ako je to definované vyššie.

HDM-4 má implementované dva algoritmy pre optimalizáciu vybraných alternatív: matematickú optimalizáciu lineárnym programovaním (v terminológii HDM-4 „totálna enumerácia“) a metódu IBC [23].

Matematická optimalizácia je založená na binárnom lineárnom programovaní presne podľa analogických rovníc uvedených vyššie v tejto kapitole. V symbolike HDM-4 sú zapísané v tvare:

$$\begin{aligned} TOBJ[X_{sm}] &= \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^{M_s} OBJ_{sm} \cdot X_{sm} \rightarrow \max \\ \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^{M_s} R_{smqt} \cdot X_{sm} &\leq TR_{qt}, \quad \forall q \in \{1, \dots, Q\}, \forall t \in \{1, \dots, T\} \\ \sum_{m=1}^{M_s} X_{sm} &\leq 1, \quad \forall s \in \{1, \dots, S\} \end{aligned}$$

kde:

S je počet homogénnych úsekov,

M_s je počet alternatív homogénneho úseku s ,

OBJ_{sm} je zvolený optimalizačný cieľ (buď čistá súčasná hodnota alebo priemerné zníženie IRI),

sm je index označujú alternatívu m na úseku s ,

X_{sm} je rozhodovacia premenná výberu alternatívy m na úseku s (hodnota 1; inak 0),

R_{smqt} je nediskontovaná výška zdroja typu q v rozpočtovom období t ,

TR_{qt} je výška rozpočtu zdroja typu q v období t ,

Q je počet rozpočtovaných zdrojov,

T je dĺžka rozpočtovaného obdobia.

Ako optimalizačné ciele je možné použiť buď maximalizáciu čistej súčasnej hodnoty alebo maximalizáciu priemerného zníženia pozdĺžnej nerovnosti vyjadrenej ako IRI.

Zložitosť riešenia je úmerná s veľkosťou $M^S \cdot QT$ (M je priemerný počet alternatív jedného úseku). S rastúcim počtom úsekov, alternatív a dĺžky analyzovaného obdobia sa riešenie solverom HDM-4 stáva neúnosným z hľadiska náročnosti na čas riešenia a použitú pamäť. HDM-4 z tohto dôvodu obmedzuje tento spôsob riešenia na menej ako

100 homogénnych úsekov, menej ako 16 alternatív pre úsek a menej ako 5 rozpočtových období. Na druhej strane ale, ako už bolo spomenuté aj v tomto texte, výsledky sú zaručene optimálne, na rozdiel od druhého spôsobu.

Druhý spôsob riešenia sieťového plánovania v HDM-4 je založený na modifikovanej metóde IBC (pozri kap. 3.5.2). Skutočné výsledky tejto heuristiky sú otáznе, nakoľko sa uvažuje rozpočtovanie vo viacerých rokoch.

3.7.4 dTIMS

Produkt dTIMS spoločnosti Deighton používa pre zostavovanie plánu ÚOR metódu IBC. [14]. Produkt umožňuje používateľovi nadefinovať si vlastné degradačné modely, katalógy technológií, ako aj spôsoby výpočtu nákladov a benefitov. Všetky nájdené popisované implementácie pracujú s jednoduchým počítaním technických benefitov cez rozdiel plôch.

Uvažuje s viacročným rozpočtovým obmedzením, ktoré spracováva bližšie nepopísanou viacprechodovou heuristikou, ktorej kvalitu výsledkov sme nenašli nikde popísanú.

3.7.5 Washington, USA

V americkom štáte Washington existuje jedna z najdlhších tradícií aplikácie konceptov hospodárenia s cestnou sieťou. Už do roku 1969 sa používal ranking typu worst-first.

V roku 1993 sa zaviedol princíp najnižších nákladov životného cyklu (LLCC). Programy sú zostavované tak, že pre daný úsek sa striktne volí alternatíva minimalizujúca náklady životného cyklu.

Sieťový dvojročný kízavý plán sa vytvára nasledovne [18]. Najprv sa kandidátske projekty kategorizujú do siedmich kategórií:

Kategória 1: projekty už programované (v predchádzajúcom období),

Kategória 2: projekty s vysokým rizikom veľkých výdavkov (rekonštrukcie), ak by boli ďalej odložené,

Kategória 4: projekty konverzie AC povrchu na náter (chip-seal),

Kategória 5: všeobecná kategória (bez zvláštnych požiadaviek),

Kategória 6: projekty, ktoré možno odložiť údržbou,

Kategória 7: nájazdové rampy.

Následne sa počíta rankingový faktor, tzv. doláre na pruhu-míľu-nákladné vozidlo (\$/LMT), a to z:

1. nákladov – stavebné náklady a náklady na spracovanie projektu a DIO na pruhu-míľu,
2. získaných pruhu-míľo-rokov (LMY) – počet pruhu-míľ násobených očakávaným predĺžením životnosti v rokoch,
3. dopravná intenzita ťažkých nákladných vozidiel (trucks).

Projekty sa triedia najprv podľa kategórie a v rámci kategórie podľa \$/LMT.

Programujú sa len úseky, ktoré boli vybrané na základe technických indexov pre rehabilitáciu v danom roku (pre asfaltové vozovky na základe porúch povrchu, hĺbky koľají a IRI). Technické indexy sú spracované do formy, pri ktorej ich hodnota okolo 50 signalizuje najvhodnejší čas na rehabilitáciu z hľadiska minimalizácie nákladov životného cyklu.

4 Návrh sieťového plánovania ÚOR v podmienkach SR

V tejto kapitole je popísaný súčasný stav informačného systému SHV na Slovensku z pohľadu modelovania vývoja stavu vozoviek a algoritmizácie zostavovania sieťových plánov ÚOR a návrh na zmenu.

4.1 Súčasný stav

Na Slovensku prevádzkuje informačný systém hospodárenia s vozovkami Slovenská správa ciest (IS MCS Vozovky). Túto aplikáciu majú k dispozícii všetci správcovia cestných komunikácií.

V aktuálnej verzii (Q3 2019) je implementovaný na úrovni cestnej siete nástroj „Vyhodnotenie stavu cestnej siete“. Tento nástroj poskytuje správcovi možnosť zostaviť návrh jednoduchého programu ÚOR na báze worst-first rankingovej metódy so zloženým triediacim kľúčom. Triedi sa na základe klasifikačných stupňov E_{ekv} , IRI, RUT a počtu TNV.

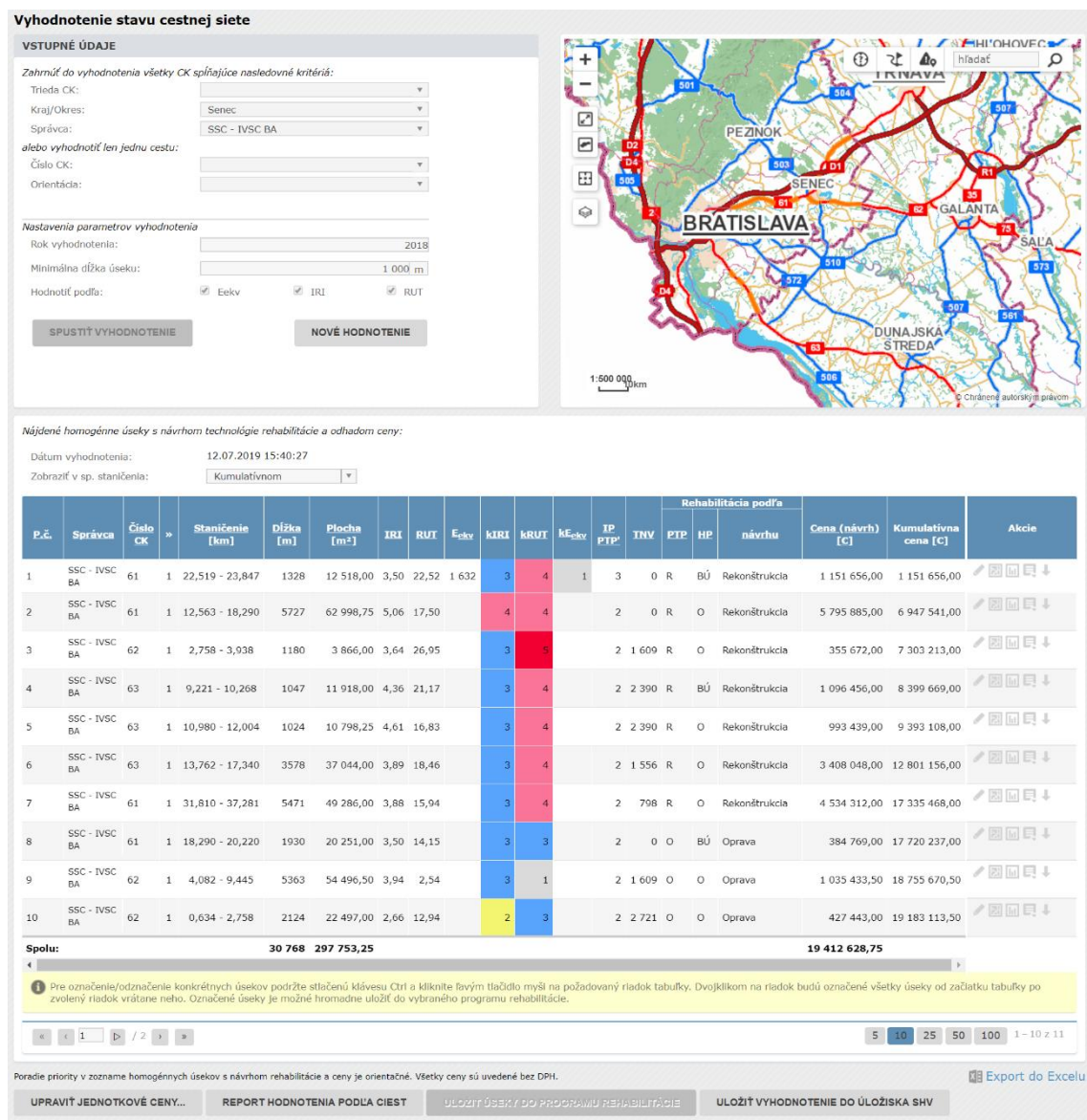
Nástroj rozoznáva štyri základné druhy ÚOR: údržba, oprava, oprava so zosilnením a rekonštrukcia. Jednotlivé technológie sa priradujú na základe konfigurovateľných pravidiel v administrácii systému. V pravidlách je možné použiť veľké atribúty vyšetrovaného úseku v roku hodnotenia; momentálne sa využívajú klasifikačné stupne IRI a RUT. Technológie majú priradenú jednotkovú cenu v €/m². V nástroji nie sú použité žiadne modely vývoja stavu vozoviek.

Používateľ si môže na začiatku zvoliť parametre podsiete, úseky ktorej budú posudzované (podľa kraja, okresu, správcu, triedy alebo konkrétnych ciest).

Nástroj v sebe obsahuje viacstupňovú homogenizáciu zvolenej podsiete. Vo viacerých krokoch sa postupne zlučujú úseky podľa klasifikačných stupňov E_{ekv} , IRI a RUT (tam, kde sú dostupné) za neustálej kontroly štatistických parametrov reprezentatívnych hodnôt potenciálnych homogénnych úsekov.

Následne nástroj aplikuje pravidlá na odvodenie orientačného návrhu technológie.

Posledným krokom je zotriedenie zoznamu vstavanými pravidlami na získanie worst-first zoznamu. Jednotlivé úseky z tohto zoznamu si používateľ môže následne preniesť do zoznamu úsekov na ďalšie riešenie (tzv. program rehabilitácií).



Obrázok 14 Ukážka nástroja "Vyhodnotenie stavu cestnej siete" v IS MCS Vozovky

4.2 Premenné technické parametre

4.2.1 Súhrn

Premenné technické parametre vozoviek vyjadrujú rôzne fyzické charakteristiky vozovky, ktoré sa menia v čase aj bez priamych zásahov správcom a je prakticky možné kvantifikovať ich okamžité skutočné alebo odhadované hodnoty.

Pre sieťové plánovanie SHV majú viacero významov. Používajú sa ako:

- priame metriky pre kvalitu siete, a to ako:
 - optimalizačné ciele a následne
 - pre vyhodnotenie predpokladaných vplyvov realizácie uvažovaného plánu ÚOR,
- nepriame (vstupné) metriky pre kvalitu siete vyjadrenú spoločenskými metrikami, ktoré sa používajú analogicky (optimalizačné ciele a vyhodnotenie vplyvov),
- termy (premenné) v logických pravidlách intervenčných (zásahových) kritérií,
- zmenové premenné v dopadových pravidlách (resetoch).

Tieto použitia sú analyzované ďalej v texte.

Nasledujúca tabuľka uvádza prehľad premenných technických parametrov vozoviek vyhodnocovaných z meraní, ktoré pripadajú do úvahy pre sieťové plánovanie SHV:

Ka- te- gó- ria	Parameter	Meracie zariadenie	Korelačné vplyvy ³	Pravidelné meranie na úrovni cestnej siete	
				Súčasnosť	Návrh
Nerovnosti	IRI (pozdĺžne nerovnosti)	laserový profilometer	komfort jazdy, subj. hodnotenie používateľov, prevádzkové náklady vozidiel, stratové časy, bezpečnosť premávky, exhaláty	Áno	Áno
	hĺbka koľaje (pričné nerovnosti)		subj. hodnotenie používateľov, komfort jazdy, bezpečnosť premávky	D/RC/I – 1 ročne II – ½ ročne	D/RC/I – 1 ročne II – ½ ročne
Protišmyk. vlast.	Mu (pozdĺžne trenie)	laserový profilometer	bezpečnosť premávky, prev. náklady vozidiel	Nie	Nie Len kritické úseky
	MPD (makrotex- túra)	Skiddometer BV 11	bezpečnosť premávky, prev. náklady vozidiel	Áno D/RC/I – 1 ročne II – ½ ročne	Áno D/RC/I – 1 ročne II – ½ ročne
Stav povrchu	UCI (trhliny)	vizuálny záznam (LineScan)	štruktúrna životnosť vozovky, rozvoj ďalších porúch povrchu vozovky, subj. hodnotenie používateľov	Nie	Áno ⁴ D/RC - 1 ročne II – 2/3 ročne II – ½ ročne III – ¼ ročne
Únosnosť	priehybová krivka, SCI/BCI	FWD KUAB	štruktúrna životnosť vozovky	Nie	Áno ⁵ D/RC/I – 1/3 ročne
	E _{ekv}				
	RSL				

³ korelačné vplyvy sú prevzaté z [31]

⁴ návrh na pravidelné merania zariadením LineScan vychádza z analýzy v [29]

⁵ návrh na pravidelné merania zariadením FWD vychádza z analýzy v [31]

V ďalšom texte uvádzame doplňujúci rozbor k jednotlivým technickým parametrom.

4.2.2 Pozdĺžne nerovnosti

Index IRI vyjadrujúci pozdĺžnu nerovnosť vozoviek počítaný na úsekoch o dĺžke 20 m je vyhovujúcim technickým parametrom pre sieťové plánovanie. Meranie pre D/RC/I (1 × ročne) diagnostickou technikou SSC je v dostatočnej frekvencii.

4.2.3 Priečne nerovnosti

Hĺbka vyjazdených koľají vyjadrujúca priečne nerovnosti vozoviek s reprezentatívnou hodnotou na úsekoch o dĺžke 20 m je vyhovujúcim technickým parametrom pre sieťové plánovanie. Meranie pre D/RC/I (1 × ročne) diagnostickou technikou SSC je v dostatočnej frekvencii.

4.2.4 Mu

Parameter Mu vyjadrujúci koeficient pozdĺžneho šmykového trenia pri meraní zariadením Skiddometer BV11 je vhodným doplnkovým technickým parametrom sieťového plánovania.

V súčasnosti sa Mu systematicky nemeria. Celú cestnú sieť v dostatočnom časovom intervale nie je v súčasných podmienkach SR reálne zmerať bez výraznejších investícií.

Do sieťového plánovania ÚOR SHV je však možné uvažovať s meraním na vybraných rizikových miestach z pohľadu bezpečnosti, ako sú napríklad miesta pred priechodmi pre chodcov, križovatky, prieťahy CK obcami vo všeobecnosti, prudké stúpania a klesania a pod.

Tieto rizikové miesta je možné v databáze SHV označiť. Pri sieťovej analýze sa bude brať na týchto úsekoch do úvahy aj hodnotenie protišmykových vlastností parametrom Mu.

4.2.5 MPD

Parameter MPD (priemerná hĺbka profilu) je vhodný parameter pre celosieťové plánovanie ÚOR v SHV. Meranie pre D/RC/I (1 × ročne) diagnostickou technikou SSC je v dostatočnej frekvencii.

4.2.6 Stav povrchu

Stav povrchu zatiaľ nie je komplexne uspokojivo doriešený na sieťovej úrovni.

Niektoré poruchy povrchu vozovky je možné zástupne zistiť sledovaním niektorých technických parametrov meraných diagnostickou technikou, ide o:

- vyjazdené koľaje: parameter hĺbky vyjazdených koľají,
- poruchy prejavujúce sa stratou drsnosti: parametre Mu a MPD.

Zvyšné poruchy, ktoré by z pohľadu sieťového plánovania ÚOR mohli byť sledované, sú:

- trhliny,
- výtlky,
- vypieranie,
- rozpad okrajov.

Celkový plošný podiel výskytu trhlín môže byť reprezentovaný parametrom UCI, ktorý sa dá vyhodnotiť z výstupov zariadenia LineScan. V tomto prípade sú prítomné dva problémy:

- UCI nerozlišuje medzi rôznymi druhmi trhlín,
- softvér dodávaný výrobcom zariadenia LineScan nemá uspokojivú úroveň presnosti a automatizácie detekcie trhlín.

Tieto problémy by malo vyriešiť nové softvérové riešenie pre spracovanie vizuálnych záznamov zo zariadenia LineScan. Presnosť detekcie by sa mala zvýšiť a detekcia by mala byť plne automatizovaná využitím moderných prístupov strojového učenia sa. Detekčné jadro by mal byť schopné aj rozpoznávať medzi rôznymi druhmi trhlín, o.i. priečne, pozdĺžne a sieťové, rovnako ich aj triediť podľa šírky do rôznych kategórií závažnosti.

V [29] sa uvádza návrh nového systematického plánu bežných meraní na úrovni cestnej siete pre zariadenie LineScan. Táto frekvencia by mala byť dostatočná pre potreby sieťového plánovania ÚOR v SHV.

Prítomnosť výtlkov uvažuje degradačný model HDM-4. Výtlky sú však závažná porucha v jazdnosti a aj v súlade s aktuálne platnými predpismi by mali byť odstraňované bezodkladne v rámci bežnej údržby, a to bez ohľadu na ročné obdobie.

Rovnako s vypieraním a rozpadom okrajov uvažuje HDM-4.

Pre tieto tri poruchy v súčasnosti nie je potenciál spoľahlivého sieťového zisťovania. Teoreticky by výtlky mohli byť rozpoznané detekčným jadrom nového softvéru pre LineScan, avšak ten bude vyvinutý primárne pre trhliny a jeho úspešnosť rozpoznávania výtlkov aj vzhľadom na ich často voľným pohľadom nejednoznačnú obrazovú stopu je zatiaľ otázná. Rozpady okrajov by mohli byť tiež rozpoznané, avšak vzhľadom na šírku záberu LineScanu (3,5 m) bude prioritou snímať jazdný pruh.

Výtlky, vypieranie a rozpady okrajov zatiaľ nenavrhujeme zaradiť do sieťového plánovania. Plošnú mieru rôznych druhov trhlín vyjadrenú špecializovanými parametrami UCI navrhujeme zaradiť.

4.2.7 Únosnosť, prevádzková výkonnosť

V súčasnosti sa únosnosť na úrovni cestnej siete nemeria a neodvádzajú sa tak metriky zvyškovej prevádzkovej výkonnosti vozoviek pre cestnú sieť.

Bez posúdenia únosnosti a nadväzujúcej zvyškovej štruktúrnej životnosti (zvyškovej prevádzkovej výkonnosti) je možnosť zostavenia ekonomicky optimálneho programu ÚOR veľmi sporná.

Pozitívne efekty zahrnutia posúdenia prevádzkovej výkonnosti do sieťového plánovania ÚOR potvrdzuje aj množstvo zahraničných výskumov a analýz. Napr. z reportu FWHA [30]: zavedenie štruktúrnej analýzy zmenilo oproti dovtedy používanej čisto funkčnej analýze (optimalizácia len na prevádzkovú spôsobilosť) navrhované technológie na približne 60 % úsekoch, interval medzi navrhovanými technológiami sa zvýšil rovnako o 60 %, jednotkové náklady sa znížili o 4 %.

Základným dátovým vstupom pre posúdenie únosnosti a nadväzné výpočty sú merania priehybových charakteristík vozoviek, na Slovensku zariadením FWD KUAB.

Z vyššie spomenutých dôvodov je veľmi žiaduce (nevyhnutné) zaviesť systematické meranie priehybov na úrovni cestnej siete pre D/RC/I. Analýza a návrh frekvencií meraní je uvedený v [31].

TP 031 rozoznáva hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek:

1. ekvivalentným modulom pružnosti (E_{ekv}),
2. indexom krivosti povrchu (SCI) a indexom krivosti podkladu (BCI),
3. spätným výpočtom.

Metóda spätného výpočtu vzhľadom na požadované vstupy (hrúbky a materiály jednotlivých vrstiev konštrukcie vozovky) nie je vhodná pre sieťové plánovanie ÚOR.

Prakticky je možné využiť pri sieťovom plánovaní ÚOR prvé dve metódy po transformácii na klasifikačné indexy. Na toto je potrebné rozlíšiť, či ide o netuhú alebo polotuhú asfaltovú vozovku a v metóde 1 aj hodnotu TNV.

Dopravná intenzita, zvlášť TNV, je kľúčový údaj pre sieťové plánovanie a bude musieť byť doplnená do databáz SHV aj z iných dôvodov (vyžaduje ich o.i. aj ekonomický modul).

„Tuhosť“ vozovky (netuhá/polotuhá) bude doplnená do Registra konštrukcie vozoviek IS MCS EKON.

Okrem E_{ekv} a BCI/SCI má vysoký potenciál odvodený parameter zvyškovej prevádzkovej výkonnosti (RSL). Je možné ho orientačne spočítať z E_{ekv} podľa postupu uvedeného v TP 058 [32]. Zvyšková prevádzková výkonnosť sa vyjadruje kvôli vzájomnej porovnateľnosti medzi úsekmi v sieťovom plánovaní v rokoch. Túto je možné spočítať z predikcie dopravného zaťaženia.

4.2.8 Zaradenie únosnosti do sieťového plánovania SHV

Na tomto mieste je potrebné poznamenať, že posudzovanie únosnosti vozoviek je možné zahrnúť do algoritmizovaného plánovania ÚOR viacerými spôsobmi.

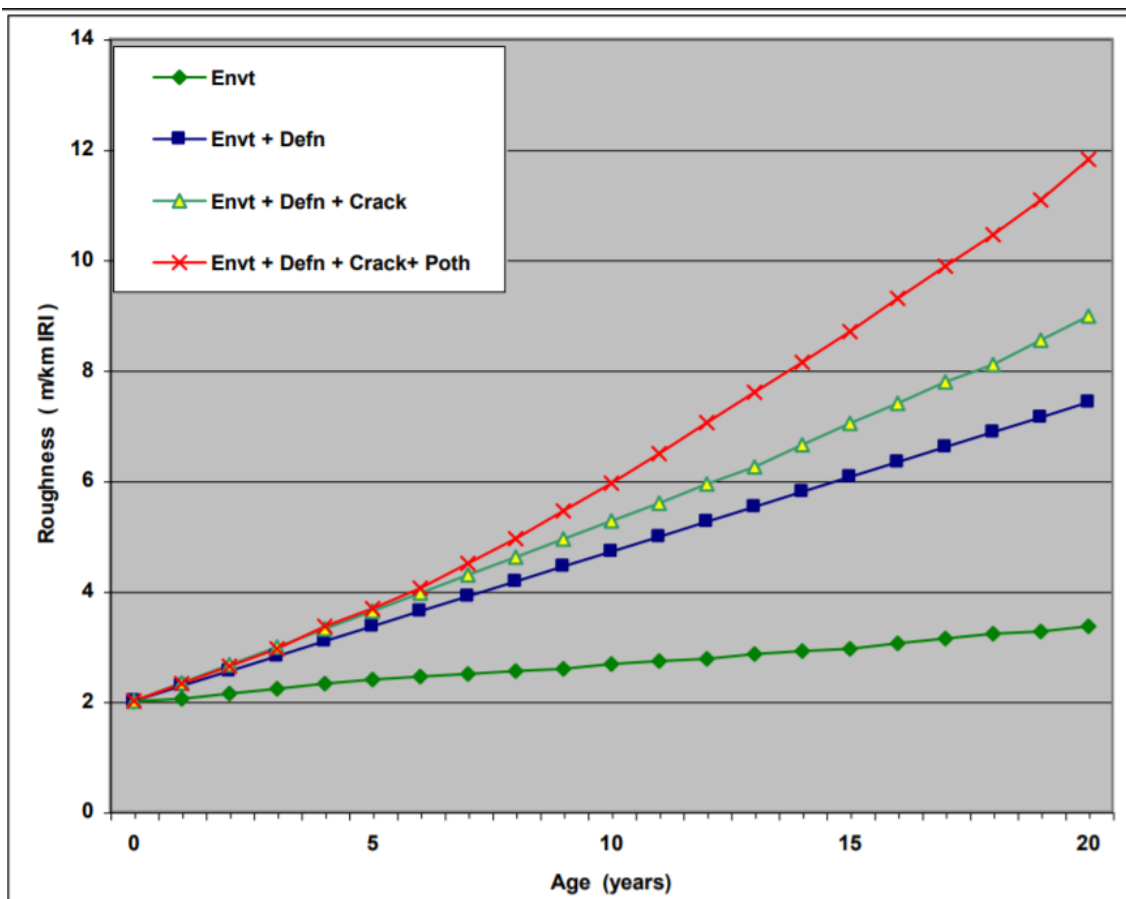
Priamočiare je využitie metrík únosnosti v rámci intervenčných kritérií a dopadových pravidiel katalógu technológií.

Rovnako metriky únosnosti môžu byť súčasťou optimalizačných cieľov – používateľ môže zaradiť ako cieľ pre zostavenie plánu ÚOR niektorú z metrík pre únosnosť podobne ako iný technický parameter.

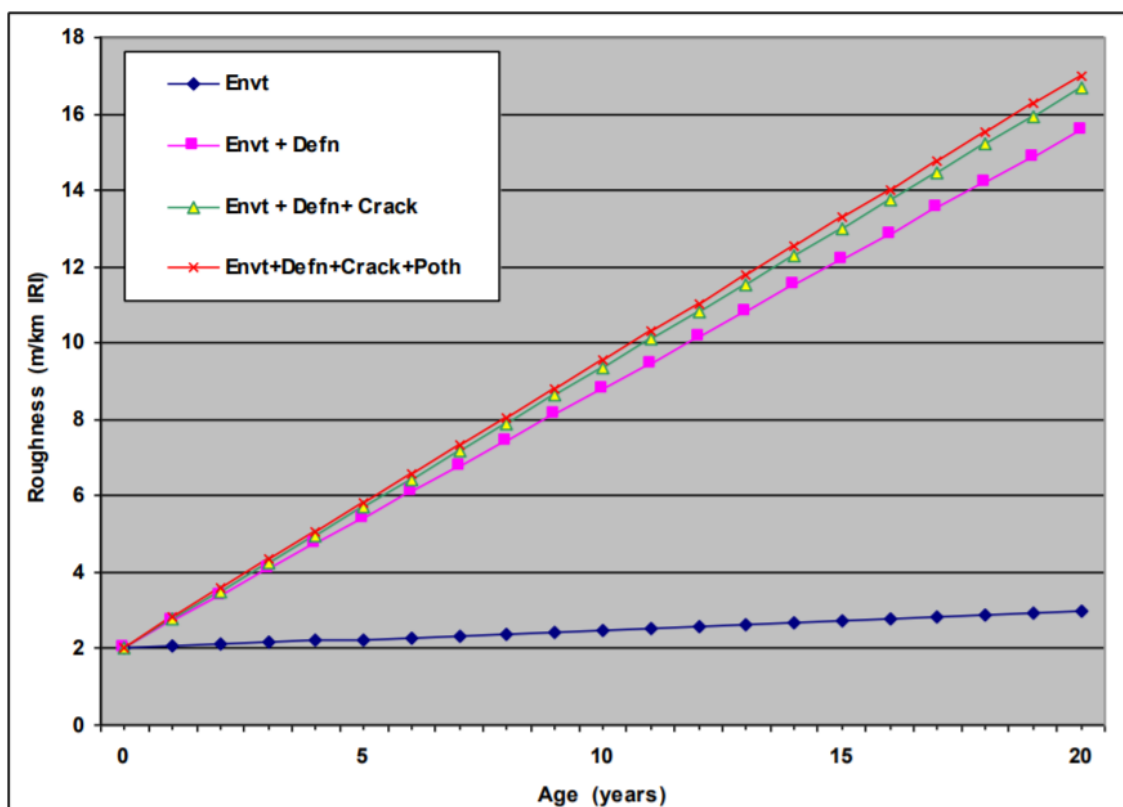
Únosnosť však môže vstupovať do algoritmov aj nepriamo. Typický prípad predstavuje optimalizácia na metriky kvality siete vyjadrujúce spoločenské náklady. V zásade by plán ÚOR mal odrážať predovšetkým potreby používateľov (a cez externality aj zvyšok spoločnosti), čo znamená de facto optimalizáciu (nepriamo) na parametre prevádzkovej spôsobilosti. Prevádzková výkonnosť vstupuje do systému v tomto prípade implicitne.

Degradácie parametrov prevádzkovej spôsobilosti majú svoju štruktúrnú zložku. Po „vyčerpaní“ únosnosti vozovky môžeme očakávať prudký rozvoj porúch povrchu vozovky. Štruktúrna zložka rovnako ovplyvňuje rýchlosť rozvoja istých parametrov prevádzkovej spôsobilosti aj počas celej životnosti. Tieto fakty sú dobre dokladované napr. extenzívnym výskumom financovaným Svetovou bankou, na základe ktorých boli vypracované modely radu HDM. Napríklad v degradačnom modeli HDM-4 nižšia únosnosť vozovky spôsobuje rýchlejší rozvoj priečnych aj pozdĺžnych nerovností (pozri aj kap. 2.6.9.6, 2.6.9.7).

Účinky únosnosti v degradačnom modeli HDM-4 pre IRI je možné vidieť na nasledujúcich dvoch obrázkoch (dátové série sú: Envnt – príspevok kvôli prostrediu, Defn – deformačná zložka, Crack – príspevok kvôli trhlinám, Poth – príspevok kvôli výtlkom):



Obrázok 15 Priebeh komponentov IRI v degradačnom modeli HDM-4 pre únosnejšiu vozovku (SNP = 6), prebraté z [33]



Obrázok 16 Priebeh komponentov IRI v degradačnom modeli HDM-4 pre menej únosnú vozovku (SNP = 3) [33]

Je zrejmé, že na priebeh IRI majú najväčší vplyv deformačné zložky závislé o.i. od únosnosti konštrukcie vozovky. Subsidiárne sa podieľa únosnosť na degradácii IRI aj formou zložky trhlín.

Vplyv únosnosti vozovky je v tomto prípade vyjadrený v degradačných modeloch parametrov prevádzkovej spôsobilosti. Tento fakt je potrebné zohľadniť pri ich vývoji, a to v rámci charakteristického atribútu konštrukcie vozovky alebo samostatného charakteristického atribútu vyjadrujúceho únosnosť pri použití konceptu rodín vozoviek (kap. 2.3).

4.3 Spoločenské metriky pre kvalitu siete

Spoločenské metriky pre kvalitu siete sú metriky vyjadrujúce prínosy v podobe znížených spoločenských nákladov za predpokladu realizácie uvažovaného plánu ÚOR voči základnému scenáru, ktorým je celoplošná bez-zásahová stratégia.

Spoločenské náklady sú náklady, ktoré znáša spoločnosť s prevádzkou cestnej siete. Počítajú sa do nich interné náklady systému, ako aj externality.

Existuje viacero metodík na posudzovanie spoločenských nákladov. Každá z nich môže definovať jednotlivé zložky spoločenských nákladov trochu iným spôsobom, niektoré sa môžu líšiť aj v jednotlivých zložkách a predovšetkým v spôsobe výpočtu (kvantifikácii) týchto zložiek.

Spoločenské metriky plnia v sieťovej optimalizácii plánu ÚOR funkciu optimalizačných cieľov. Plán ÚOR sa teda optimalizuje na ich minimalizáciu.

V nasledujúcej analýze budeme vychádzať z modelu HDM-4, ktorého časti ekonomického modulu sú perspektívnym kandidátom do optimalizačného sieťového plánovania ÚOR v SHV na Slovensku.

Celkové spoločenské náklady spojené s prevádzkou vozidiel po danej cestnej sieti sú súčtom:

$$SC = RUC + EMISSC + TACCC + NOISEC$$

kde RUC sú náklady používateľov systému:

$$RUC = VOC + TIMEC$$

kde VOC sú prevádzkové náklady vozidiel a $TIMEC$ sú časové náklady na prepravu cestujúcich a tovaru.

$$VOC = C_{fuel} + C_{tires} + C_{lubricants} + C_{maintlabor} + C_{maintparts} + C_{deprec} + C_{interest} + C_{crewtime} + C_{overhead}$$

a

$$TIMEC = TIMEC_{pass} + TIMEC_{cargo}$$

kde $TIMEC_{pass}$ sú prepravné náklady pasažierov a $TIMEC_{cargo}$ sú prepravné náklady tovarov.

$EMISSC$ sú externé náklady z emisií ovzdušia, $TACCC$ sú interné a externé náklady z dopravnej nehodovosti a $NOISEC$ sú externé náklady negatívnych vplyvov hluku z cestnej dopravy.

Emisie ovzdušia sú kvantifikované v HDM-4 len v prirodzených jednotkách, dopravná nehodovosť a hluk nie vyčísľovaná vôbec.

4.3.1 Prevádzkové náklady vozidiel (VOC)

Prevádzkové náklady vozidiel (angl. vehicle operating costs, VOC) sú náklady spojené so samotnou prevádzkou vozidiel na cestách. Hlavnými zložkami sú:

1. priame náklady – spotrebné náklady na pohonné hmoty a mazivá, náklady na údržbu vozidiel (práca, pneumatiky a náhradné diely),
2. mzdové náklady vodičov a posádky vozidiel,
3. kapitálové náklady (odpisy a úroky),
4. režijné náklady (správa vozidlovej flotily, parkovanie, poisťky atď.).

$$VOC = C_{fuel} + C_{tires} + C_{lubricants} + C_{maintlabor} + C_{maintparts} + C_{deprec} + C_{interest} + C_{crewtime} + C_{overhead}$$

Zatiaľ do prevádzkových nákladov navrhujeme počítať zložky uvedené v bodoch 1 a 2. V modeli HDM-4 sú prevádzkové náklady funkciou vyjadriteľnou z hľadiska nezávislých premenných ako:

$$VOC = f(IRI, MPD, NTP, Traffic)$$

Optimalizačný cieľ na VOC teda inherentne optimalizuje stav cestnej siete aj z hľadiska prevádzkovej spôsobilosti vyjadrenou technickými parametrami IRI a MPD a prostredníctvom degradačnej funkcie IRI aj implicitne z hľadiska prevádzkovej výkonnosti.

Z hľadiska ďalších vstupov a analýzy ich dostupnosti na výpočet funkcie ide o:

Nezávislá premenná	Dostupnosť (na úrovni cestnej siete)	Navrhovaný dátový zdroj
šírka vozovky jazdného pásu	áno	IS MCS NTP
počty jazdných pruhov a ich šírky	áno	IS MCS NTP
výškové vedenie [m/km]	áno	IS MCS NTP
priemerný počet stúpaní a klesaní [km ⁻¹]	áno	IS MCS NTP + dopočet

smerové vedenie [$^{\circ}.\text{km}^{-1}$]	áno	IS MCS NTP + dopočet
nadmorská výška	áno	IS MCS RS/IS MCS NTP
priečny sklon [%]	áno	IS MCS NTP
kryt vozovky	áno	IS MCS NTP + IS MCS Vozovky EKON
rýchlostné limity	áno	IS MCS NTP
vozidlová flotila	áno	Národný kalibračný súbor HDM-4
vzory dopravného zaťaženia	áno	Národný kalibračný súbor HDM-4
podiel jazdy na snehu a na vode	nie	Zatiaľ nastaviť na 0 % a 0 %
prítomnosť nemotorovej dopravy	nie	Redukčný súčiniteľ nemotorovej dopravy uvažovať 1,0.
prekážky plynulosti dopravy	čiastočne	Redukčný súčiniteľ prekážok plynulosti dopravy uvažovať 1,0.
RPDI	čiastočne	Údaje CSD z evidencie odd. dopravného inžinierstva SSC

Rôzne potrebné jednotkové náklady budú prebraté z národného kalibračného súboru HDM-4.

4.3.2 Časové náklady (TIMEC)

Časové náklady predstavujú peňažne kvantifikovaný čas potrebný na prepravu pasažierov (cestovné časy) a nákladu. Pokiaľ hovoríme o prínosovej strane (rozdiel v časových nákladoch v posudzovanom stave a východiskovom stave), nazývame ich aj ako **náklady na časové straty**.

Ekonomický model HDM-4 dokáže spočítať časové náklady, ktoré sú dôsledkom:

- aktuálnych hodnôt technických parametrov prevádzkovej spôsobilosti,
- konfiguráciou cesty, predovšetkým jej šírkovým usporiadaním a geometrickými vlastnosťami,
- dopravno-inžinierskymi charakteristikami (vlastnosti dopravného prúdu, dopravné intenzity, maximálne povolené rýchlosti).

Pre výpočet týchto stratových časov je potrebné v zásade disponovať údajmi uvedenými pre výpočet VOC.

V zahraničí sa často počítajú aj časové náklady spôsobené prácami na ceste. Realizácia ÚOR uzávierkami rôznej povahy a následným spomaľovaním dopravy a potenciálnou tvorbou kongescií tým zvyšuje ich nákladovú stránku, ktorá nemusí byť pri vysokých intenzitách dopravy a relatívne časovo dlhých prácach vôbec nízka. Metodiku pre výpočet tejto zložky bude nutné pripraviť.

4.3.3 Emisie (EMMISC)

Emisie uvoľňované do ovzdušia pochádzajúce z cestnej dopravy sú:

- plynne exhaláty, predovšetkým oxid uhličitý (CO_2), oxidy dusíka ($\text{NO}+\text{NO}_2$), oxid uhoľnatý (CO), metán (CH_4), amoniak (NH_3), uhľovodíky celkovo (THC),
- pevné látky o priemere menšom ako 10 μm (PM_{10}) a menšie ($\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$).

Ekonomický model HDM-4 dokáže kvantifikovať objemy nasledovných látok: CO_2 , NO_2 , CO , SO_2 , uhľovodíky, tuhé látky a olovo.

Navrhujeme zatiaľ zaradiť do emisnej nákladovej zložky emisie CO₂, NO₂ a pevné látky. Objem exhalovaného oxidu uhličitého a pevných častíc je funkciou objemu spálených pohonných hmôt a objem oxidu dusičitého je okrem toho aj funkciou priemernej životnosti vozidla (predpokladá sa, že čím je vozidlo opotrebovanejšie, tým existuje vyšší potenciál na emisie NO₂).

Objem spálených pohonných hmôt sa počíta pri výpočte VOC a životnosť vozidiel je parametrom vstupnej vozidlovej flotily, takže potrebné dátové vstupy budú získané už na tento účel.

HDM-4 kvantifikuje len objemy uvoľnených emisií v prirodzených jednotkách (tony). Bude potrebné stanoviť jednotkové spoločenské náklady pre tieto emisie (v €/t).

Existuje viacero metodík a modelov na stanovenie týchto jednotkových nákladov. V rámci ďalšej analýzy jednotkových cien by ich bolo vhodné porovnať a stanoviť hodnoty pre použitie v SHV.

Keďže emisné náklady nie sú internalizované, t.j. spoločenské náklady z produkovaných emisií sú rovné externým nákladom, je možné vychádzať z Príručky o externých nákladoch v doprave z dielne Európskej komisie [34] (posledná aktualizácia v roku 2019).

Pre polutanty určuje jednotkové náklady nasledovne (v tabuľke okrem Slovenska sú uvedené aj susedné štáty EÚ) [€/kg]:

Krajina	NH ₃	NM VOC	SO ₂	NO _x mesto	NO _x mimo mesto	PM2.5 metropol. ⁶	PM2.5 mesto	PM2.5 mimo mesto	PM10 priemer
Slovensko	24,4	0,7	10,1	24,8	14,7	328	105	59	12,3
Česká republika	27,4	1,1	11,6	24,8	14,8	361	116	72	39,6
Maďarsko	18,9	0,8	9,9	26,8	15,8	317	102	59	8,5
Poľsko	14,4	0,7	8,2	14,7	8,9	282	91	52	5,2
Rakúsko	27,8	2,3	16,2	41,4	24,3	466	151	87	30,9

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 [€/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.

⁶ metropolitné územie = mestá a aglomerácie s viac ako 0,5 mil. obyvateľmi.

Pre sieťové plánovanie SHV je možné vychádzať zo strednej hodnoty pre krátke a stredné obdobie (100 €/t).

4.3.4 Dopravná nehodovosť (TACCC)

Dopravná nehodovosť je z hľadiska bezpečnosti cestnej premávky kľúčová zložka spoločenských nákladov.

HDM-4 momentálne nemá model na výpočet dopravnej nehodovosti ako funkcie parametrov posudzovaného úseku.

Pre túto zložku bude potrebné pripraviť národný model.

4.3.5 Hluk (NOISEC)

Hlukové emisie momentálne nie sú v súčasnej verzii HDM-4 modelované.

Pre túto zložku bude potrebné pripraviť národný model.

Jednotkové náklady počítané na 1 dB na 1 osobu ročne je možné prevziať z Príručky o externých nákladoch dopravy [34], ktorá pre cestnú dopravu uvádza:

L_{den} [dB(A)]	Obťažovanie	Vplyvy na zdravie	Spolu
50 – 54	14	3	17
55 – 59	28	3	31
60 – 64	28	6	34
65 – 69	54	9	63
70 – 74	54	13	67
≥ 75	54	18	72

L_{den} je vážený priemer A-váženej úrovne hluku pre obdobia deň, večer a noc (day, evening, night).

4.3.6 Úloha premenných technických parametrov pri optimalizácii na spoločenské náklady v modeli HDM-4

Ako bolo poukázané vyššie v texte, HDM-4 uvažuje pri ekonomickej analýze:

- technické parametre IRI a MPD priamo ako vstupy do výpočtu rôznych zložiek spoločenských nákladov,
- plošné podiely rôznych druhov trhlín a únosnosť vyjadrenú vo forme SNP implicitne vo svojich degradačných modeloch.

Ekonomický model HDM-4 neuvažuje (zatiaľ) s:

- hĺbkou vyjazdených koľají,
- súčiniteľmi šmykového trenia.

Vplyv vyjazdených koľají na spoločenské náklady nie ustálený. Najviac sa dávajú do súvisu s aquaplaningom za intenzívnych dažďových zrážok. Niektoré výskumy odhalili korelácie od hĺbok koľají približne 1 mm, avšak výskumy nie sú úplne jednoznačné (pozri aj [31] pre krátky súhrn). Hĺbka koľaje by sa v tomto prípade mala prejaviť ako jeden z explanatórnych parametrov modelu dopravnej nehodovosti.

Vyjazdené koľaje však vstupujú do rozhodovacích procesov sieťového plánovania minimálne v intervenčných kritériách, keďže niektoré technológie nie je možné aplikovať pri prítomnosti istej hĺbky vyjazdených koľají.

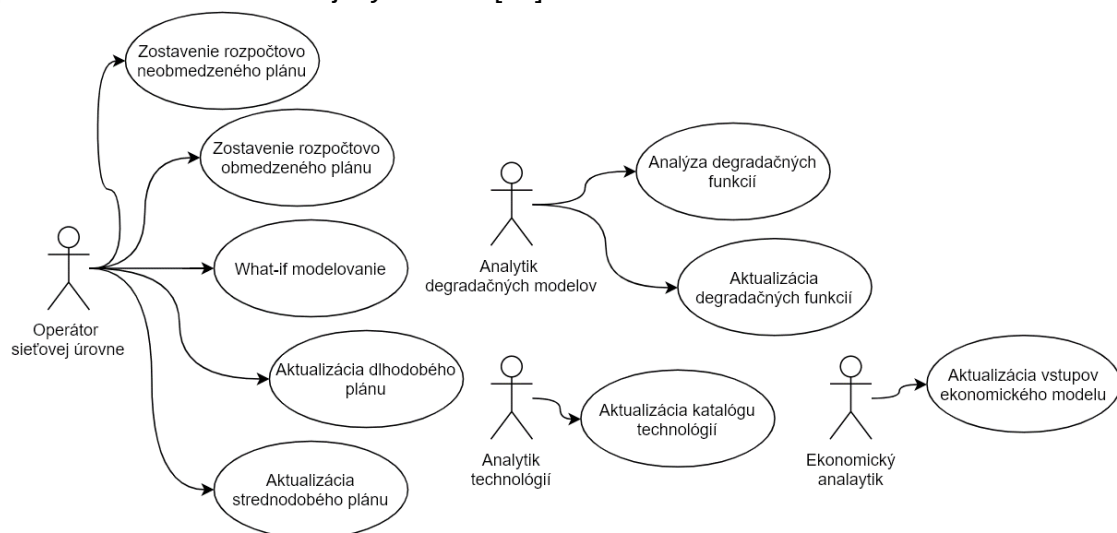
Keďže s hodnotením priecnej nerovnosti vozoviek podľa hĺbky koľají počítajú slovenské TP, v rámci multi-kritériárnej optimalizácie môže používateľ zadať priamy optimalizačný cieľ pre technický parameter hĺbky koľaje.

Technický parameter μ by mal určite vstúpiť ako explanatórna premenná do modelu dopravnej nehodovosti. Zatiaľ môže byť zadaný priamy optimalizačný cieľ pre parameter μ na kritických úsekoch a rovnako na týchto úsekoch môže byť určená minimálna povolená hodnota μ (minimálny technický štandard).

4.4 Návrh cieľového stavu

4.4.1 Základné scenáre

Nasledujúci diagram zobrazuje základné navrhované používateľské scenáre sieťového plánovania ÚOR v SHV v jazyku UML [35]:



Obrázok 17 Use case diagram pre základné scenáre sieťového plánovania ÚOR

Tieto scenáre predstavujú základné funkčné požiadavky na sieťové plánovanie ÚOR v SHV.

Bližšie sú popísané v nasledujúcej tabuľke:

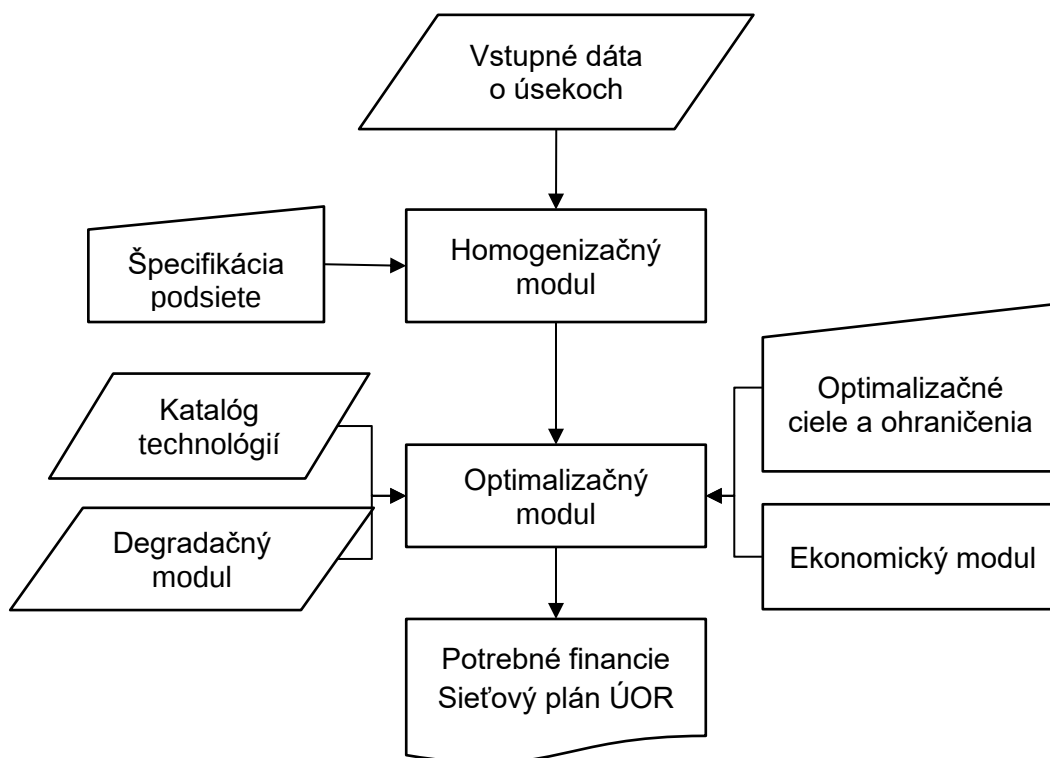
Zostavenie rozpočtovo neobmedzeného plánu	Analytik SHV zostavuje plán ÚOR s použitím optimalizačných cieľov bez rozpočtových obmedzení. Výsledkom je optimalizovaný plán ÚOR na sieťovej úrovni pri predpoklade neobmedzeného množstva finančných prostriedkov interpretovateľný ako požiadavka pre vlastníka. V generickom rozpočtovo neobmedzenom pláne ÚOR sa uvažuje minimalizácia nákladov správcu a maximalizácia spoločenských prínosov s doplnkovými optimalizačnými cieľmi v analyzovanom období aspoň 10 rokov. Pripúšťa sa zostavovanie aj účelových plánov vytvorených s použitím špecifických optimalizačných cieľov podľa potreby.
Zostavenie rozpočtovo obmedzeného plánu	Analytik SHV zostavuje plán ÚOR s použitím optimalizačných cieľov s rozpočtovými obmedzeniami. Rozpočtové obmedzenia sú dané ako rozpočtový vektor, t.j. maximálne množstvo disponibilných finančných prostriedkov na každý rok analyzovaného obdobia. Výsledkom je optimalizovaný plán ÚOR so zohľadnením prideleného rozpočtu.

What-if modelovanie	Analytik SHV zostaví základný plán ÚOR s rozpočtovým obmedzením alebo rozpočtovo neobmedzený. Následne v systéme modifikuje niektoré základné vstupy (napr. mení vstupný rozpočtový vektor alebo upravuje cieľové hodnoty optimalizačných cieľov). Systém zostaví ďalší plán ÚOR a zobrazí diferencie vo výstupoch oproti základnému plánu ÚOR. Analytik SHV tak môže analyzovať vplyv zmien vstupov na kvalitu výsledného plánu ÚOR.
Aktualizácia dlhodobého plánu	V systéme existuje jeden generický dlhodobý strategický plán ÚOR (výhľadové obdobia aspoň 10 rokov). Tento plán ÚOR je každoročne aktualizovaný na základe výsledku zostavenia rozpočtovo obmedzeného plánu ÚOR s aktuálnymi vstupmi.
Aktualizácia strednodobého plánu	V systéme existuje jeden generický taktický kľzavý plán ÚOR na obdobie 3 rokov. Obsahuje úseky prebraté z prvých troch rokoch dlhodobého plánu, ktoré postupne prechádzajú na projektovú úroveň. Úseky, ktoré neprešli na projektovú úroveň, v taktickom pláne ostávajú na ďalšiu realizáciu, prípadne sú z neho po ďalšej úvahe odstránené.
Analýza degradačných funkcií	Presnosť degradačných funkcií je potrebné priebežne monitorovať; aspoň raz ročne je potrebná celková kontrola. Systém poskytne nástroje pre poloautomatickú analýzu presnosti degradačných funkcií. Matematickými štatistickými nástrojmi a algoritmami systém porovnáva údaje z meraní predchádzajúcich rokov prepočítané teoreticky degradačnými modelmi s aktuálnymi údajmi meraní. Výrazné rozdiely sú reportované analytikovi degradačných funkcií, ktorý rozhodne o ich prípadnej aktualizácii.
Aktualizácia degradačných funkcií	Na základe výsledkov analýzy degradačných funkcií zapracováva analytik degradačných funkcií zmeny degradačného modelu, t.j. úpravy predpisov degradačných funkcií.
Aktualizácia katalógu technológií	Katalóg technológií priebežne aktualizuje analytik katalógu technológií. Aspoň raz ročne sa analyzujú minimálne použité jednotkové ceny a aktuálnosť intervenčných kritérií a dopadových pravidiel. Na základe výsledkov sa vykoná prípadná aktualizácia.
Aktualizácia vstupov ekonomického modelu	Aspoň raz ročne sa vykoná na základe zavedeného mechanizmu posúdenie a prípadná aktualizácia vstupov ekonomického modelu, predovšetkým jednotkových nákladov. Aspoň raz tri roky sa vykoná väčšia revízia (napr. posúdenie a prípadná zmena vozidlovej flotily a pod.).

4.4.2 Architektúra sieťového plánovania ÚOR

Pre potreby sieťového plánovania ÚOR na sieti diaľnic, rýchlostných ciest a ciest I. triedy na Slovensku je navrhovaný model viacročného plánovania s využitím metód matematickej optimalizácie.

Základný koncept zodpovedajúceho informačného systému znázorňuje nasledujúci obrázok:



Obrázok 18 Základný architektonický koncept informačného systému pre sieťové plánovanie ÚOR

Jednotlivé komponenty sú popísané v tabuľke:

Komponent	Popis
Vstupné dáta o úsekoch	Databáza potrebných údajov pre sieťové plánovanie ÚOR, minimálne: • premenné technické parametre podľa potreby degradačného modelu, ekonomického modelu a katalógu technológií, • nepremenné technické parametre podľa potreby degradačného modelu, ekonomického modelu a katalógu technológií, • konštrukcia vozovky, • dopravné údaje (intenzity dopravy, predikcia intenzít dopravy, skladba dopravných prúdov, kapacita, povolené rýchlosti), • klimatické údaje (teplotné a vlhkostné parametre).
Špecifikácia podsiete	Kritéria na analyzované úseky cestnej siete, minimálne: • správca (1. úroveň, 2. úroveň), vlastník, • kraj, okres, • trieda CK,

	príznak medzinárodnej cesty alebo ťahu (E cesty, TEN-T ťahy).
Homogenizačný modul	Modul, ktorý zo vstupných úsekov podsiete pripraví homogénne úseky pre ďalšie spracovanie.
Katalóg technológií	Katalóg technológií s technológiami pre sieťové plánovanie ÚOR podľa kap. 3.2.3 a 4.4.5.
Degradačný modul	Modul s implementovaným modelom degradácie jednotlivých uvažovaných parametrov v súlade s kap. 2 a 4.4.3.
Optimalizačné ciele a ohraničenia	Ciele a ohraničenia, vzhľadom na ktoré bude prebiehať optimalizácia. Viac v kap. 4.4.6 a 4.4.7.
Optimalizačný modul	Modul, ktorý na základe vyššie popísaných vstupov a dát vytvorí daný sieťový plán ÚOR formou matematickej optimalizácie podľa kap. 3.6 a 4.4.8.
Potrebné financie; Sieťový plán ÚOR	Výstupy systému. Pre rozpočtovo neobmedzený plán aspoň projekcia potrebných financií a ideálne aj navrhovaný sieťový plán ÚOR. Pre rozpočtovo obmedzený vždy obe.

4.4.3 Degradačný modul

Degradačný modul sa skladá z:

1. databázy rodín vozoviek a degradačných funkcií delených do rodín vozoviek – tzv. degradačný model. Degradačný model je v databáze verzionovaný,
2. predikčného modulu pre predpoveď stavu homogénneho úseku v analyzovanom období na základe vstupných dát o úseku,
3. administratívneho používateľského rozhrania pre manažment degradačného modelu,
4. štatisticko-analytického modulu pre monitorovanie presnosti predpovedí degradačného modelu.

Podporované degradačné modely sú deterministické. Funkčné predpisy je možné uviesť v ľubovoľnom tvare v kontextovom alebo rekurzívne vyčísliteľnom jazyku.

Konečnú formu degradačného modelu (t.j. konkrétne funkčné predpisy) určí nadväzujúca úloha.

Predpokladá sa faktorizácia rodín vozoviek podľa:

1. konštrukcie vozovky,
2. dopravného zaťaženia,
3. klimatických pomerov, pokiaľ sa ich vplyv na území Slovenska ukáže ako významný pre potreby sieťového plánovania ÚOR.

Degradačné funkcie sa predpokladajú pre:

1. IRI,
2. hĺbku koľaje,
3. M_u ,
4. MPD,
5. UCI, resp. iné parametre trhlín povrchu vozovky,
6. parametre prevádzkovej výkonnosti (priehyby/indexy krivosti, E_{ekv}).

4.4.4 Ekonomický modul

Ekonomický modul počíta náklady a prínosy vstupnom homogénnom úseku.

Samotný výpočet vykonáva jadro ekonomického modulu, ktoré implementuje konkrétny ekonomický model. Ekonomický modul môže obsahovať viacero takýchto jadier.

Náklady správcu budú počítané uvažovaním jednotkových cien katalógu technológií a dĺžkového alebo plošného vyjadrenia daného homogénneho úseku.

Prínosy budú počítané:

- pre parametre kvality vyjadrené premennými parametrami prevádzkovej spôsobilosti ako vážená plocha pod krivkou časového priebehu týchto parametrov medzi uvažovanou alternatívou a základnou alternatívou (bez zásahov),
- pre spoločenské straty ich vyjadrením ideálne v peňažných jednotkách (monetárne). Výpočet spoločenských nákladov vo veľkej miere vychádza z modelu HDM-4 s národným kalibračným súborom, doplnený o ďalšie národné modely pre výpočet spoločenských nákladov, ktoré HDM-4 nepočíta (napr. hluk, dopravná nehodovosť).

4.4.5 Katalóg technológií

Modul katalógu technológií sa skladá z:

1. databázy technológií aplikovateľných pre sieťové plánovanie ÚOR. Databáza musí byť verzionovateľná,
2. používateľského rozhrania pre správu katalógu technológií.

Minimálna požadovaná štruktúra katalógu technológií je nasledovná:

1. názov technológie a skratka,
2. intervenčné (zásahové) kritérium: logický výraz zapísaný v aspoň bezkontextovom jazyku. Pripúšťa sa viacero výrazov, ktoré sa interpretujú logickým súčtom,
3. dopadové pravidlo (reset): výraz zapísaný v aspoň kontextovom jazyku,
4. merná jednotka [m, m²],
5. jednotkové náklady [€/m],
6. rozpočtová skupina (bežné, kapitálové),
7. predpokladaná doba realizácie.

4.4.6 Optimalizačné ciele

Optimalizačný modul sieťového plánovania ÚOR pracuje na báze viac-kriteriálnej matematickej optimalizácie.

Ako optimalizačné ciele sa používajú metriky troch kategórií:

- technické parametre a ich odvodené formy,
- spoločenské náklady, vrátane ich jednotlivých zložiek,
- náklady správcu (vlastníka, investora).

Náklady správcu sú vždy spojené s minimalizáciou cieľovej hodnoty.

Technické parametre je možné v systéme optimalizovať na:

1. minimalizáciu alebo maximalizáciu váženého priemeru hodnoty parametra na konci analyzovaného obdobia, s možnosťou podmienky monotonality (hodnota v za sebou nasledujúcich rokoch klesá/stúpa),
2. dosiahnutie alebo prekročenie (z jednej alebo druhej strany) zadanej hodnoty váženého priemeru hodnoty parametra na konci analyzovaného obdobia (možno

vyjadriť aj hodnotou klasifikačného indexu), s možnosťou podmienky monotonicity.

Spoločenské náklady (alebo ekvivalentne spoločenské prínosy) je možné optimalizovať na:

1. minimalizáciu (maximalizáciu) celkovej hodnoty na sieti,
2. minimalizáciu (maximalizáciu) váženého priemeru jednotkových nákladov (samy určené ako priemerné jednotkové náklady každého vozidla z flotily).

V rámci multi-kriteriálnej analýzy sa pripúšťa aj kombinácia jednotlivých cieľov, ktorá sa interpretuje ako logický súčin.

V systéme je prednastavený cieľ *najlepší program* (generický plán ÚOR) implementovaný ako kombinácia optimalizačných cieľov:

1. minimalizácia nákladov správcu,
2. maximalizácia spoločenských prínosov.

Najlepší program zohľadňuje ohraničenia typu MTŠ (minimálny technický štandard; pozri ďalej).

4.4.7 Optimalizačné ohraničenia

Používateľ môže klásť na hľadaný plán ÚOR dva základné typy ohraničení:

1. rozpočtové obmedzenie,
2. minimálne technické štandardy (MTŠ).

Rozpočtové obmedzenia môžu byť špecifikované pre každý rok analyzovaného obdobia zvlášť. Systém bude podporovať členenie disponibilných finančných prostriedkov na základné kategórie (minimálne bežné a kapitálové prostriedky). Na toto členenie budú naviazané jednotkové ceny uvedené v katalógu technológií.

Minimálne technické štandardy sú podmienky, ktoré:

1. musí spĺňať vo výslednom pláne ÚOR každý úsek, pre ktorý je daný štandard určený, ak sa plán zostavuje v tzv. tvrdom móde MTŠ,
2. by malo spĺňať vo výslednom pláne ÚOR čo najviac úsekov, pre ktoré je daný štandard určený, ak sa plán zostavuje v tzv. mäkkom móde MTŠ.

MTŠ sú špecifikované ako logické výrazy v minimálne bezkontextovom jazyku.

4.4.8 Optimalizačný modul

Jadro optimalizačného modulu je implementované formou *multi-kriteriálnej matematickej optimalizácie*. Použitý solver musí byť schopný v deterministickom polynomiálnom čase dospieť k riešeniu čo najviac spĺňajúceho maximalizačné a minimalizačné ciele a rešpektujúce zadané ohraničenia. Počet iterácií solvera, prípadne povolený čas, musí byť umožnený zadať na vstupe.

Generická forma použitého zadania je nasledovná:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot B_{ijb} \rightarrow \max, b = 1, \dots, N_B, \\
 & \frac{\sum_{i=1}^m l(i) \cdot P_p(i, N)}{\sum_{i=1}^m l(i)} \rightarrow \max, p = 1, \dots, N_{p1} \\
 & \frac{\sum_{i=1}^m l(i) \cdot P_p(i, N)}{\sum_{i=1}^m l(i)} > TP_p, p = 1, \dots, N_{p2} \\
 & \frac{\sum_{i=1}^m l(i) \cdot P_p(i, 1)}{\sum_{i=1}^m l(i)} \leq \dots \leq \frac{\sum_{i=1}^m l(i) \cdot P_p(i, N)}{\sum_{i=1}^m l(i)} \text{ (monotonalita)} \\
 & \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot C_{ij} \rightarrow \min, \\
 & \sum_{j \in A_i} X_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, m, \\
 & \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot \vec{C}_{ij} \leq \vec{CC}, \\
 & \sum_{i=1}^m \sum_{j \in A_i} X_{ij} \cdot q(i, j) \geq \vec{Q}.
 \end{aligned}$$

kde:

X_{ij} je binárna rozhodovacia premenná označujúca, či alternatíva j na úseku i bude vybratá do výsledného plánu ÚOR (hodnota 1) alebo nie (hodnota 0),

A_i je množina všetkých uvažovaných stratégií na úseku i ,

m je počet uvažovaných úsekov,

B_{ij} je súčasná hodnota prínosov č. b stratégie j na úseku i ,

N_B je počet optimalizačných cieľov (BUNV) maximalizujúcich prínosy,

$l(i)$ je dĺžka úseku i ,

$P_p(i, n)$ je hodnota technického parametra pre p -ty cieľ prekročenia hodnoty parametra na úseku i v roku n ,

N_{p1} je počet cieľov (BUNV) maximalizácie priemernej hodnoty technických parametrov,

N_{p2} je počet cieľov (BUNV) prekročenia priemernej hodnoty technických parametrov,

C_{ij} je súčasná hodnota nákladov na realizáciu stratégie j na úseku i ,

$\vec{C}_{ij}$ je nákladový vektor stratégie j na úseku i ,

$\vec{CC}$ je rozpočtový vektor plánu ÚOR,

$q(i, j)$ je funkcia naplnenia MTŠ, ktorá priradzuje stratégii j na úseku i vektor naplnenia MTŠ. Vektor naplnenia MTŠ je vektor s binárnymi členmi, ktorý má na pozícii r hodnotu 1, pokiaľ je MTŠ číslo r naplnené na úseku i ,

$\vec{Q}$ je vektor s binárnymi členmi o dĺžke všetkých MTŠ v systéme. Položka na pozícii r má hodnotu 1, pokiaľ je MTŠ číslo r zaradené do optimalizácie.

Optimalizačný cieľ minimalizácie nákladov správcu by mal byť vždy prítomný (zaradený do optimalizácie).

Optimalizačný modul musí podporovať analyzované obdobie v dĺžke aspoň 10 rokov.

4.4.9 Flexibilita informačného systému pre sieťové plánovanie ÚOR

Navrhovaná softvérová podpora v súlade s popisom uvedeným vyššie je flexibilná ku zmenám základných parametrov optimalizačného modulu v zmysle umožnenia ich zmien bez potreby programátorských zásahov. Konkrétne ide o

- definíciu rodín vozoviek,
- definíciu degradačného modelu,
- definíciu katalógu technológií,
- nastavenie parametrov ekonomického modulu.

Nepovoľuje sa tieto parametre programovať „natvrdo“.

Jadro ekonomického modulu realizujúce výpočty nákladov a prínosov musí byť možné vymeniť a musí byť umožnené dopĺňať ďalšie alternatívne ekonomické modely formou rozšírení (napr. zásuvné moduly) bez programátorských úprav zvyšku softvérovej podpory sieťového plánovania ÚOR.

5 Návrh ďalšieho postupu a odporúčania

Vzhľadom na dôležitosť finančno-vecného plánovania ÚOR vozoviek na Slovensku pri obmedzených finančných prostriedkoch je potrebné pristúpiť k implementácii systému viacročného sieťového plánovania ÚOR bezodkladne.

Navrhované sú nasledovné kroky:

Úloha	Navrhovaná forma a zabezpečenie
Implementácia modulárneho systému pre viacročné optimalizované sieťové plánovanie, v ktorom - je možné bez potreby programátorských zásahov meniť a upravovať degradačné modely, - je možné vo forme doplnkov alebo rozšírení postupne implementovať rôzne výpočty prínosov (najskôr technické, potom postupne pokročilejšie spôsoby vyjadrovania spoločenských strát).	Rozšírenie IS MCS Vozovky
Stanovenie rodín vozoviek, katalógu technológií, modelovaných parametrov a funkčných predpisov (funkcií) deterministických degradačných modelov. V rámci stanovenia katalógu technológií aktualizovať a zjednotiť v súčasnosti používané katalógy technológií (napr. HDM-4, SEH). Navrhnuť mechanizmus pravidelnej aktualizácie.	Rozborová úloha alebo v rámci rozšírenia IS MCS.
Návrh modelov pre vyjadrenie spoločenských strát, postupne pre: - prevádzkové náklady vozidiel a stratové cestovné a prepravné časy, vrátane stratových časov vyvolaných prácami na ceste z dôvodu realizácie ÚOR, - dopravnú nehodovosť, - emisie, - hlučnosť, - odolnosť cestnej siete. V rámci úlohy analyzovať a navrhnuť zjednotenie v súčasnosti používaných modelov niektorých zložiek (napr. HDM-4). Navrhnuť mechanizmus pravidelnej aktualizácie.	Rozborová úloha alebo v rámci rozšírenia IS MCS
Návrh plánu meraní premenných parametrov vozoviek, frekvencie meraní a požadovanej kvality údajov pre potreby sieťového plánovania ÚOR.	Zmeny jednotlivých TP pre výkon meraní a prípadne jedno zjednocujúce nové TP.
Zavedenie evidencie dopravných intenzít na každom sčítacom úseku cestných komunikácií v SR a jej pravidelná aktualizácia aspoň na polročnej báze.	Interná analýza a následné rozhodnutie o pokračovaní.

6 Záver

Rozborová úloha vo svojej prevažne syntetickej časti prezentovanej kapitolami 2 a 3 podáva generálny prehľad možností modelovania degradácii vozoviek vhodných pre sieťovú úroveň systému hospodárenia s vozovkami a algoritmických prístupov pre zostavenie plánu ÚOR na tejto úrovni. Súčasne s týmto prehľadom sú v príslušných kapitolách uvedené aj príklady z reálnych a fungujúcich implementácií SHV v zahraničí. Táto časť slúži hlavne ako referencia pre ďalšie úlohy implementácie sieťovej úrovne SHV na Slovensku.

Kapitola 4 na základe analýzy možností a reálnych potrieb navrhuje základný rámec pre implementáciu sieťového plánovania ÚOR pre diaľnice, rýchlostné cesty a cesty I. triedy na Slovensku. Ako je zrejmé aj z faktov uvedených v tejto rozborovej úlohe, sieťové plánovanie ÚOR musí byť realizované prostredníctvom softvérovej podpory, teda informačného systému. V popísanom rámci sa stanovujú základné východiská a určujú základné požiadavky, ktoré sa od takéhoto informačného systému očakávajú (napr. použitie deterministických modelov, algoritmu viac-kriteriálnej matematickej optimalizácie, formy požadovaných optimalizačných cieľov a metrík kvality cestnej siete a i.).

Táto rozborová úloha predstavuje jeden z prvých krokov implementácie sieťovej úrovne SHV novej generácie na Slovensku ako rozšírenia dlhoročne budovaného SHV v gescii Slovenskej správy ciest. Návrh ďalších krokov je popísaný v kapitole 5.

7 Referencie

- [1] Federal Highway Administration, An Advanced Course in Pavement Management Systems [Pokročilý kurz v systémoch hospodárenia s vozovkami; interný školiaci materiál], Federal Highway Administration, 1992.
- [2] M. M. Nunez a M. Y. Shahin, „Pavement condition data analysis and modeling [Analýza dát a modelovanie stavu vozoviek],“ *Pavement Response, Evaluation and Data Collection*, pp. 125-132, 1986.
- [3] M. Y. Shahin, M. M. Nunez, M. R. Broten, S. H. Carpenter a A. Sameh, „New Techniques for Modeling Pavement Deterioration [Nové techniky pre modelovanie degradácií vozoviek],“ *Pavement management and weight in motion*, pp. 40-46, 1987.
- [4] R. L. Lytton, „Concepts of Pavement Performance and Modeling,“ *Proceedings, Second North American Conference on Managing Pavements, Vol. II*, pp. 2.3-2.19, 1987.
- [5] W. D. O. Paterson, Road Deterioration and Maintenance Effects [Degradácie ciest a následky údržby], Washington: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 1987.
- [6] A. Mohseni, M. I. Darter a J. P. Hall, „Alternative methods for pavement network rehabilitation management [Alternatívne metódy riadenia rehabilitácií sietí vozoviek],“ Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1992.
- [7] K. T. Hall, Y.-H. Lee a M. I. Darter, „Forecasting Pavement Rehabilitation Needs for Illinois Interstate Highway System,“ *Transportation Research Record*, 1994.
- [8] Highway Research Board, „The AASHO Road Test [Cestný test AASHO],“ National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1962.
- [9] A. Garcia-Diaz a M. Riggins, „Serviceability and Distress Methodology for Predicting Pavement Performance [Metodika prevádzkovej funkčnosti a porúch pre predpovedania degradácie vozoviek],“ *Transportation Research Record* 997, pp. 56-61, 1984.
- [10] A. Cheetham, „Auto-adaptive pavement performance prediction methodology [Auto-adaptívna metodológia predpovedania degradácií vozoviek],“ *4th International Conference on Managing Pavements*, 1998.
- [11] N. Li, R. Hass a W.-C. Xie, „Investigation of Relationship Between Deterministic and Probabilistic Prediction Models in Pavement Management [Prieskum vzťahu medzi deterministickými a pravdepodobnostnými degradačnými modelmi],“ *Journal of the Transportation Research Board*, 1997.
- [12] A. Garcia-Diaz, M. Riggins a S. J. Liu, „Development of Performance Equations and Survivor Curves for Flexible Pavements [Vývoj výkonnostných rovníc a kriviek životnosti pre netuhé vozovky],“ Texas Transportation Institute, College Station, 1984.
- [13] European Commission, Directorate General Transport, COST 324: Long Term Performance of Road Pavements [Dlhodobý výkon cestných vozoviek], Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1997.

- [14] A. Hueppi a A. Weninger-Vycuil, „dTIMS: The NRA Pavement Management System [dTIMS: Systém hospodárenia s vozovkami v NRA],“ rev. *NRA National Roads Conference*, Galway, 2013.
- [15] L. Heckel a Y. Ouyang, „Update of Condition Rating Survey (CRS) Calculation/Prediction Models - Final Report [Aktualizácia modelov pre výpočet a predpoveď CRS],“ Heckel Engineering, Research & Education, Inc. , Springfield, 2007.
- [16] L. Premkumar a W. R. Vavrik, „Enhancing pavement performance prediction models for the Illinois Tollway System [Vylepšenie degradačných modelov vozoviek pre Illinois Tollway System],“ *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp. 14-19, 2016.
- [17] G. H. Bham, N. G. Gharaibeh a M. I. Darter, GIS-ILLINET Version 2.0 Pavement Management and Information System User's Guide [Používateľská príručka ku GIS-ILLINET, verzia 2.0, informačnému systému a systému hospodárenia s vozovkami], Urbana-Champaign: University of Illinois, 2003.
- [18] J. Uhlmeyer, D. Luhr a T. Rydholm, Pavement Asset Management [Hospodárenie s vozovkovým majetkom], Olympia: Washington State Department of Transportation, 2016.
- [19] R. K. Kay, J. P. Mahoney a N. C. Jackson, The WSDOT Pavement Management System - A 1993 Update [Systém hospodárenia s vozovkou ministerstva dopravy štátu Washington - aktualizácia v roku 1993], Seattle: Washington State Transportation Center (TRAC), 1993.
- [20] A. Ferreira, L. d. Picado-Santo, Z. Wu a G. Flintsch, „Selection of pavement performance models for use in the Portuguese PMS [Výber degradačných modelov pre použitie v portugalskom SHV],“ *International Journal of Pavement Engineering*, 2011.
- [21] Z. He, OPAC 2000: A New Pavement Design System [OPAC 2000: Nový systém pre návrh vozoviek], Waterloo: University of Waterloo, 1997.
- [22] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, „Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów [Diagnostika stavu vozoviek a jej prvkov],“ Varšava, 2015.
- [23] 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.
- [24] „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.
- [25] E. G. Fernando a W. Hudson, „Development of a prioritization procedure for the network level pavement management system [Vývoj prioritizačnej procedúry pre systém hospodárenia s vozovkami na sieťovej úrovni],“ Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, Austin, 1983.
- [26] M. Shahin, S. Kohn a R. M. W. Lytton, „Pavement M&R Budget Optimization Using the Incremental Benefit-Cost Technique [Optimalizácia údržby, opráv a rekonštrukcií využitím techniky inkrementálnych prínosov a nákladov],“ 1985.
- [27] F. Farid, D. W. Johnston, B. S. Rihani a C.-J. Chen, „Feasibility of Incremental Benefit-Cost Analysis for Optimal Budget Allocation in Bridge Management Systems [Realizovateľnosť inkrementálnej prínosovo-nákladovej analýzy pre alokáciu

optimálneho rozpočtu v systémoch hospodárenia s mostami],“ *Transportation Research Record* 1442, pp. 77-87, 1994.

- [28] A. Mohseni, M. I. Darter a J. P. Hall, „Illinois Pavement Network Rehabilitation Management Program [Illinoiský program hospodárenia rehabilitácií vozoviek na sieťovej úrovni],“ *Transportation Research Record*, 1990.
- [29] O. Svačina, „Identifikácia porúch vozoviek z výstupov zariadenia LineScan,“ Slovenská správa ciest, Bratislava, 2018.
- [30] R. Carvalho, R. Stubstad, R. Birggs, O. Selezneva, E. Mustafa a A. Ramachandran, „Simplified Techniques for Evaluation and Interpretation of Pavement Deflections for Network-Level Analysis [FHWA-HRT-12-023] [Zjednodušené techniky na hodnotenie a interpretáciu priehybov vozoviek v sieťovej analýze],“ Federal Highway Administration, 2013.
- [31] O. Svačina, „Strategický reporting stavu vozoviek na úrovni cestnej siete,“ Slovenská správa ciest, Bratislava, 2019.
- [32] „TP 058: Zosilňovanie asfaltových vozoviek,“ Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, Bratislava, 2012.
- [33] S. Meskellie, „Evaluation of Structural Performance, Deterioration and Optimum Maintenance Strategies for Asphalt Roads [Vyhodnotenie prevádzkovej výkonnosti, degradácií a optimálnych údržbových stratégií pre asfaltové vozovky],“ TU Delft, 2004.
- [34] 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.
- [35] Object Management Group, „Unified Modeling Language,“ Needham.
- [36] R. Haas, W. R. Hudson a J. Zaniewski, Modern Pavement Management [Moderné hospodárenie s vozovkou], Malabar: Kriger Publishing Company, 1994.
- [37] „Pavement Management Primer,“ , . [Online]. Available: <http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/pmprimer.pdf>. [Cit. 28 4 2019].
- [38] N. J. Garber a L. A. Hoel, Traffic & Highway Engineering [Dopravné a cestné inžinierstvo], 4 ed., Toronto: Cengage Learning, 2009.
- [39] F. Peng a Y. Ouyang, „Pavement Program Planning based on Multi-Year Cost-Effectiveness Analysis [Plánovanie programov vozoviek založené na viacročnej nákladovo-prínosovej analýze],“ *Civil Engineering Studies, Illinois Center for Transportation Series*, 2010.
- [40] Federal Highway Administration, „Interné školiace materiály pre hospodárenie s vozovkami,“ 1998.
- [41] T. Martin a P. Kadar, „The Scoping and Development of Probabilistic Road Deterioration (RD) Models [Ohraničovanie a vývoj pravdepodobnostných degradačných modelov ciest],“ Austroads Ltd , Sydney, 2012.
- [42] J. G. Russo, „Revalidation of Iowa type survivor curves [Revalidácia kriviek prežitia iowského typu],“ Iowa State University, Ames, 1978.
- [43] TP 031: Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB, Bratislava: Ministerstvo dopravy pôšt a telekomunikácií SR, 2009.