

Ambrusné Somogyi Kornélia

Útburkolat-gazdálkodás változó feltételek melletti
optimalizációs modelljei

Doktori értekezés

Témavezetők:

Dr. Bakó András, Széchenyi István Egyetem, Budapesti Műszaki Főiskola

Dr. Gáspár Csaba, Széchenyi István Egyetem

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Bevezetés.....	4
I. Háttér.....	6
1. Leggazdaságosabb útvonalak meghatározása.....	6
1.1. A probléma megfogalmazása.....	6
1.2. Minimális hosszúságú út két pont között.....	7
1.3. Faépítő módszerek.....	7
1.4. Mátrix eljárások.....	11
1.5. Javasolt eljárások ritka hálózatok esetén.....	14
1.6. A módszerek összehasonlító vizsgálata.....	17
2. Forgalom ráterhelési - előrebecslési matematikai modellek.....	19
2.1. Forgalom-előrebecslési és -szétosztási eljárások.....	19
2.1.1. Növekedési tényezős modellek.....	22
2.1.2. Gravitációs modellek.....	28
2.2. Ráterhelési eljárások.....	30
3. Útburkolat gazdálkodási modellek (Pavement Management System – PMS).....	37
3.1. Megoldási módszerek.....	37
3.2. Heurisztikus modellek.....	41
3.2.1. Éves tervek készítése.....	42
3.2.2. Többéves terv készítése.....	44
3.2.3. OPMS eljárás.....	45
3.2.4. APMS modell.....	46
3.3. Optimális úthálózat-fenntartás meghatározása.....	47
3.3.1. Egészértékű modellek.....	47
3.3.2. Lineáris programozási modell.....	48
3.3.3. Hálózati szintű PMS.....	50
3.3.4. Útburkolat-gazdálkodási modell kidolgozása.....	60
3.3.5. A Markov-féle modell hazai pontosítása.....	63
3.3.6. Sztochasztikus modell kialakításának a lehetősége.....	64
II. Eredményeim.....	67
4. Autópálya PMS modell kidolgozása.....	67

5.	A PMS adatbázis háttere	73
5.1.	Autópálya-adatbázis	73
5.2.	Városi adatbank létrehozása.....	75
6.	Forgalomfüggő útburkolat-gazdálkodási modell	84
6.1.	Heurisztikus modell.....	85
6.2.	Matematikai optimalizációs modell	89
7.	Mérnöki szerkezetek karbantartásának optimalizációs modellje	100
7.1.	Modell kialakítása	101
7.2.	Optimalizációs modell.....	104
8.	Következtetések, javaslatok	111
	Irodalomjegyzék.....	114

Bevezetés

A közlekedési hálózatok fejlesztésének tervezésénél nagyon lényeges a fenntartási költségek előrebecslése, az útburkolat-gazdálkodással kapcsolatos teendők és az ezekhez szükséges erőforrások megállapítása. Az úthálózat a nemzeti vagyon mintegy egyötödét teszi ki. Ennek a vagyonnak a megfelelő minőségi szinten tartása minden kormányzat egyik legfontosabb feladata. A minőségmegőrző, illetve -javító beavatkozásokat viszont a legkisebb költséggel kell megvalósítani.

A jelenlegi útburkolat-gazdálkodási modellek (PMS – Pavement Management System) részben heurisztikus, részben optimalizációs eljárással dolgoznak. Hiányosságuk – akár hálózati, akár a projekt szintű modelleket tekintjük –, hogy csak a jelenlegi forgalmi helyzetet veszik figyelembe. A motorizáció fejlődésével a forgalom nagysága és összetétele hosszabb idő alatt lényegesen megváltozik, az ennek figyelembevétele nélkül készített modellek nem alkalmasak az útburkolat-gazdálkodással kapcsolatos tevékenységek és a költségek hosszabb távú előrejelzésére. Az útburkolat-gazdálkodási modellek egyik legfontosabb eleme a leromlási modell. A hosszú távú modellek esetén elengedhetetlen a forgalmi jellemzők időperiódusonkénti előrebecslése. A másik fontos tényező az útburkolat aktuális állapota. A modell rendszerint tartalmazza ennek a változását, de az időszakonként történő állapotfelvétel adataival is célszerű ezeket pontosítani. Dolgozatomban leírom az általam kidolgozott eljárásokat, amelyek mind a forgalomváltozást, mind az új állapotfelvétel adatait felhasználják. Ezen új modellek segítenek a valósághűbb leromlási folyamat meghatározásában és ezzel a korábbiaknál pontosabb eredmények elérésében is.

A megoldást olyan modell kidolgozása jelenti, amely figyelembe veszi a forgalom megváltozását, és az optimális állapotjavító tevékenységeket és ezek költségeit évenkénti forgalomráterheléssel határozza meg.

A dolgozat első fejezetében áttekintem és értékelem a leggazdaságosabb – legrövidebb utak meghatározásával kapcsolatos algoritmusokat. Javaslatot teszek az ún. ritka mátrixok esetén a tárolási módra és az útvonalak meghatározására.

A második fejezetben a forgalom előrebecsléssel kapcsolatos matematikai modelleket tekintem át. Javaslatot teszek a PMS-ben legjobban alkalmazható eljáráscsomagra.

A harmadik fejezet a PMS-modellekkel, azok előnyeivel és hátrányaival foglalkozik. Elemzem a hosszú távú többperiódusos rendszerek szakmai hiányosságait. Ezeknek a kiküszöbölésére kidolgozott új algoritmust a disszertáció második részében mutatom be.

A negyedik fejezettől kezdődően az általam készített rendszereket mutatom be. A negyedik fejezetben ismertetem az autópálya PMS-t.

Az ötödik fejezetben az új PMS-hez alkalmazható adatbázis kialakítását mutatom be.

Majd a hatodik fejezetben ismertetem a PMS új modelljét, amely figyelembe veszi a változó forgalmi viszonyokat is.

A hetedik fejezetben az algoritmusnak a mérnöki szerkezetek karbantartási modellje esetére végrehajtott általánosítását mutatom be.

Az utolsó fejezet a modelltől levonható következtetéseket, javaslataimat foglalja össze.

I. Háttér

1. Leggazdaságosabb útvonalak meghatározása

1.1. A probléma megfogalmazása

A forgalomelosztási probléma egyik központi kérdése a leggazdaságosabb útvonalak meghatározása. Ez a feladattól függően jelenthet legkisebb költségű, legrövidebb távolságú, legrövidebb utazási idejű útvonalat – a továbbiakban ezt nevezzük legrövidebb, vagy minimális útvonalnak. Két modell létezik, az egyik a rendszerorientált, ahol az összes utazás költsége minimális, a másik a felhasználó (ún. user) orientált megoldás, ahol az egyén a leggazdaságosabb útvonalon akarja elérni a célját. A két modell megoldása csak lineáris költségfüggvény esetén esik egybe [23]. Nemlineáris esetben meggondolandó, hogy milyen megoldást válasszunk. Az eljárások gyorsasága ugyanis nagyban függ a nagyszámú útvonal meghatározásának sebességétől. Az eljárást alkalmazzuk a forgalomgenerálásnál, -elosztásnál is. Az optimális úthálózat meghatározása is igényli a legrövidebb út meghatározására szolgáló hatékony eljárásokat.

Az algoritmusok használatához az alábbi jelöléseket vezetjük be.

- Az úthálózat irányított gráf.
Pontjainak véges halmazát jelölje V , $V = \{a_i\}$, a pontok száma: $\|V\| = K$.
- Éleinek halmazát jelölje E , $(a_i, a_j) \in E$, az élek száma: $\|E\| = L$.
- Az (a_i, a_j) él hosszát vagy utazási idejét jelölje $l_{a_i a_j}$, vagy röviden l_{ij} .
- Az $s \in V$ pontból a $t \in V$ pontba vezető utat P_{st} -vel jelöljük, és a $P_{st} = (s = a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_{v+1}} = t)$ útvonal hosszán az

$$l(P_{st}) = \sum_{i=1}^v l_{a_i a_{i+1}} \quad (1.1)$$

értéket értjük. Legrövidebb út az a \bar{P} , amelyre $l(\bar{P}_{st}) = \min_{P_{st}}(P_{st})$.

A P út hosszával kapcsolatban leggyakrabban a következő feladatokat fogalmazzuk meg:

- a. Határozzuk meg az $s, t \in V$ rögzített pontok között azt a P_{st} utat, amelyre (1.1) minimális.

- b. Határozzuk meg a rögzített $s \in V$ pontból a hálózat összes $a_i \in V$ (vagy röviden $i \in V$) pontjába a legrövidebb P_{si} utakat. (Ez az ún. minimális kifeszítő fa.)
- c. Keressük meg a hálózat minden $a_i, a_j \in V$ (röviden $i, j \in V$) pontpárja között a P_{ij} legrövidebb hosszúságú utakat, azaz határozzuk meg a multiterminális minimális hosszúságú utat az adott irányított gráfban.
- d. Határozzuk meg a fenti a–c feladatok valamelyik változatára az első k számú legrövidebb utat, amelyet arra használunk, hogy a felhasználó a saját tapasztalata alapján a beduguló legrövidebb út után a második, harmadik, stb. legrövidebb utat választja.

Megjegyezzük, hogy az a. és a b. feladat csak az elérendő cél szempontjából különbözik, a két feladatot azonos eljárásokkal oldhatjuk meg. A c. feladat az a. vagy b. feladatokat megoldó algoritmusok többszöri alkalmazásával is megoldható.

A szakirodalomban a feladat fontosságának megfelelően sokszáz cikk található a problémakörrel kapcsolatban. A sokféle módszer közül itt csak az alapvető eljárásokat és a közlekedési hálózatok céljaira kifejlesztett, tárolási és futási idő szempontjából leggazdaságosabb eljárásokat ismertetem. További részletes összefoglaló olvasható még a [21, 22, 39, 41, 54, 80], szakirodalmakban.

1.2. Minimális hosszúságú út két pont között

Itt az $s \in V$ pontból a $t \in V$ pontba menő legrövidebb út meghatározásával foglalkozunk. A különbség a minimális kifeszítő fával szemben az algoritmus befejezésében van. Itt az algoritmus befejeződik, ha a t pont végleges potenciál értéket kapott, $t \in T$. A másik esetben az algoritmus befejezésének feltétele $a_i \in T, \forall a_i \in V$ esetén.

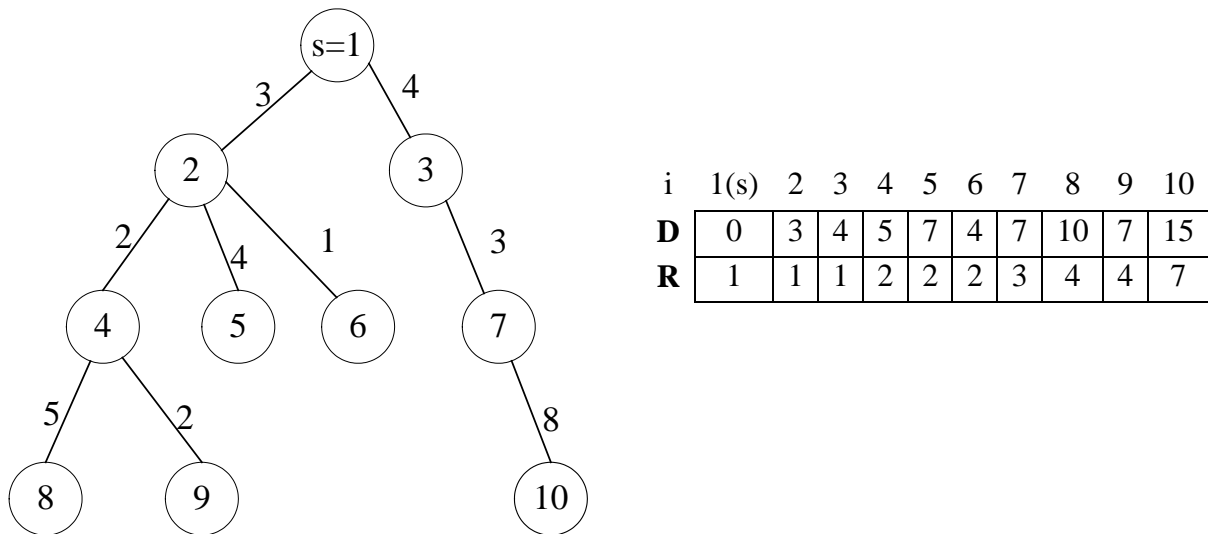
1.3. Faépítő módszerek

A fejezetben tárgyalt módszerek mindegyike egy minimális összhosszúságú (Shortest Path – SP) fát határoz meg. Ennek csúcspontja egy előre rögzített s pont, amely tartalmazza a hálózat összes $i \in V$ pontját (ha a hálózat összefüggő), és az s pontból bármelyik $i \in V$ pontig a legrövidebb P_{si} útvonalból áll. Ezt a fát s gyökérpontú minimális hosszúságú kifeszítő fának, röviden minimális fának nevezzük. Ezek az algoritmusok a fentiekben megfogalmazott a. és b. feladat megoldását szolgáltatják. Ha minden $s \in V$ -re végrehajtjuk az algoritmust, akkor a c. feladat megoldását is megkapjuk.

Egy s pontból induló minimális fa célszerűen 2 vektorral írható le. Az egyik a \mathbf{D} távolság vagy potenciálvektor, a másik az \mathbf{R} címkevektor. A \mathbf{D} vektor d_i eleme adja meg az $l(P_{si})$ távolságot, az \mathbf{R} vektor r_i eleme pedig azt a pontot szolgáltatja, amelyik a bejárásban az i pontot megelőzi. Így az útvonalat a t ponttól visszafelé rakhatjuk össze, azaz $P_{st} = (a_1, a_2, \dots, a_v)$ esetén

$$t = a_v, r_t = a_{v-1}, r_{a_{v-1}} = a_{v-2}, \dots, r_{a_2} = a_1 = s.$$

A \mathbf{D} és \mathbf{R} vektorok felépítését az 1. ábrán lévő fa esetén tekinthetjük át:



1. ábra Potenciál és címkevektor

A faépítő algoritmusok a \mathbf{D} és az \mathbf{R} vektorok feltöltését végzik. Három alapszert különböztetünk meg. Az egyik ún. potenciálmódszert Ford [44] és Minty [69] készítette. Ennek módosított, számítógépre alkalmasabb változatát írja le Dijkstra [38]. Az előzőtől elvileg különböző potenciálmódszert hozott létre D'Esopo [72].

Ford-Minty algoritmus – SPI

V pontjait két csoportba osztjuk. $V = S \cup T$, $S \cap T = \emptyset$. Az $x \in S$ pontjainak d_x potenciálja ismert, ez adja meg a legrövidebb út hosszát az $s \in S$ ponttól az x pontig. Minden lépésben egy ponttal bővítjük az S halmazt, így K lépésben meghatározzuk a minimális kifizető fát, amivel a b. feladatot megoldottuk. Az a. feladatot akkor oldottuk meg, amikor a rögzített másik végpont is bekerül az S halmazba.

Az algoritmus formális leírása a következő.

SP10: $d_s = 0, r_s = s, d_i = \infty, r_i = 0$, ha $i \neq s$, $S = \{s\}, T = V - s$.

SP11: Minden S -beli pontból minden T -beli pontba mutató élre határozzuk meg

$$\min_{\substack{i \in S \\ j \in T}} (d_i + l_{ij}) - t.$$

Jelölje a minimális értékhez tartozó i -t u , j -t pedig v , azaz

$$d_u + l_{uv} = \min_{\substack{i \in S \\ j \in T}} (d_i + l_{ij}).$$

SP12: $d_v = d_u + l_{uv}, r_v = u, S = S + v, T = T - v$.

SP13: Ha $T = \emptyset$, akkor STOP, egyébként folytassuk SP11-nél.

Az algoritmus során az SP11 lépésben az S halmaz elemszámától (x) függően legfeljebb $x(K-x)$ összeadást és összehasonlítást kell elvégezni. Az SP12 lépésben 2 értékadás, továbbá az S halmaz növelése (T csökkentése) szerepel. Ezt nem is kell külön regisztrálni, mert az S halmaz azokat a pontokat tartalmazza, amelyekre $d_i < \infty$, a T halmaz pedig azokat, amelyekre $d_i = \infty$. Az algoritmus során az összes összeadások és hasonlítások számának nagyságrendje $K^3/3$. Az algoritmus jelentősen gyorsítható. Ilyen változatot mutatott Dijkstra [38].

Dijkstra algoritmus – SP2

Az algoritmus lényege az, hogy az SP11 lépésben történő összeadáskor a pontok ideiglenes potenciálnak nevezett értéket kaptak, amit ebben az algoritmusban a továbbiakban felhasználunk.

A V halmazt most három diszjunkt halmazra bontjuk: $V = S \cup A \cup T$, ahol

- S : a már végleges potenciállal rendelkező pontok halmaza,
- $A = \{y | x \in S, y \notin S, (x, y) \in E\}$ az ideiglenes potenciállal rendelkező pontok halmaza,
- $T = V \cap (S \cup A)$.

SP20: $d_s = 0, r_s = s, d_i = \infty, r_i = 0$, ha $i \neq s$, $S = \{s\}, T = V - s, A = \emptyset, u = s$.

SP21: Legyen az utoljára S -be került pont u .

Ha létezik $y \in T$, $(u, y) \in E$, akkor $A = A + y, T = T - y$, $d_y = d_u + l_{uy}$, máskülönben SP22-nél folytassuk.

SP22: Minden $y \in A$ -ra végezzük el a következőt:

$$d_{y(\text{új})} = \min(d_{y(\text{rég})}, d_u + l_{uy}).$$

SP23: Legyen $d_z = \min_{i \in A} d_i$, $r_z = u$,

$$S = S + z, A = A - z,$$

$$u = z.$$

SP24: Ha A üres (így T is üres), készen vagyunk, egyébként folytatjuk SP21-nél.

Az algoritmussal, mivel mindig csak az utoljára az S halmazba átkerült ponttal dolgozunk, $K^2/2$ -re csökkentettük az összeadások és $2K^2$ -re a hasonlítások számát.

A harmadik potenciálmódszer alapötletében különbözik az előző kettőtől. Az első két módszer esetén az S halmaz pontjai végleges potenciállal rendelkeztek, a D'Esopo-módszernél [72] viszont minden pont potenciálja ideiglenes egészen addig, ameddig az eljárást be nem fejeztük.

D'Esopo algoritmus – SP3

SP30: Legyen $S = V$, $d_s = 0$, $d_i = \infty$, ha $i \in V$, $r_s = s$, $r_i = 0$ a többi pontra.

SP31: Válasszunk egy $x \in S$ pontot, amelyre $d_x \neq \infty$.

SP32: Az összes $(x, y) \in E$ esetén végezzük el az alábbi műveleteket:

$$\text{Ha } d_y < d_x + l_{xy}, \text{ akkor } d_y = d_x + l_{xy}, r_y = x \text{ és ha } y \notin S, S = S + y.$$

SP33: $S = S - x$; ha S nem üres, menjünk SP31-re, egyébként készen vagyunk.

Ez az eljárás, annak ellenére, hogy az összes S -beli elemet végigveszi, bizonyos esetekben gyorsabb lehet, mint az előzők. Ez a helyzet akkor, ha az élek azonos hosszúságúak. Ez fordulhat elő olyan feladatoknál, ahol az úthossz helyett az élek számának minimalizálására törekszünk.

1.4. Mátrix eljárások

A mátrix eljárások segítségével a c. feladatra, azaz a multiterminális problémára kapunk közvetlen megoldást. Az eljárások az (l_{ij}) távolságmátrixon végeznek egymás után transzformációkat. Az eljárás eredményeként megkapjuk a $\mathbf{D}^{(p)} = (d_{ij}^{(p)})$ mátrixot, amelynek $d_{ij}^{(p)}$ eleme tartalmazza a P_{ij} minimális út hosszát. Egy további $\mathbf{R} = (r_{ij})$ $K \times K$ -s mátrix, megfelelően számolva, a cíkmátrix szerepét fogja betölteni. Az útvonal visszakeresése itt más módon történik, mint a faépítő eljárásoknál, ezért azt külön ismertetem. Két alapmódszer ismert. Az egyik könnyen programozható, elegáns módszer Warshall munkája [83], programját pedig Floyd [43] közölte. A másik pedig a dinamikus programozási elven működő Bellman [31] – Kalaba [63] algoritmus.

Warshall – Floyd algoritmus – SP4

Jelöljük az (i, j) pontpár közötti és közbülső pontként legfeljebb az $1, 2, \dots, k$ pontok valamelyikét tartalmazó legrövidebb utat $P_{ij}^{(k)}$ -val, az összes (i, j) pár esetén az ezen utakhoz tartozó potenciálmátrixot $\mathbf{D}^{(k)}$ -val. Az eljárás során egymás utáni lépésekben meghatározzuk a $\mathbf{D}^{(1)}, \mathbf{D}^{(2)}, \dots, \mathbf{D}^{(K)}$ és a hozzájuk tartozó \mathbf{R} mátrixokat.

Az algoritmus lépései:

SP40: Legyen $k = 1$, $\mathbf{D}^{(0)} = (l_{ij})$, azaz

$$d_{ij}^{(0)} = \begin{cases} 0, & \text{ha } i = j \\ l_{ij}, & \text{ha létezik } (i, j) \text{ él} \\ \infty, & \text{ha nincs } (i, j) \text{ él} \end{cases}$$

$$r_{ij}^{(0)} = j, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

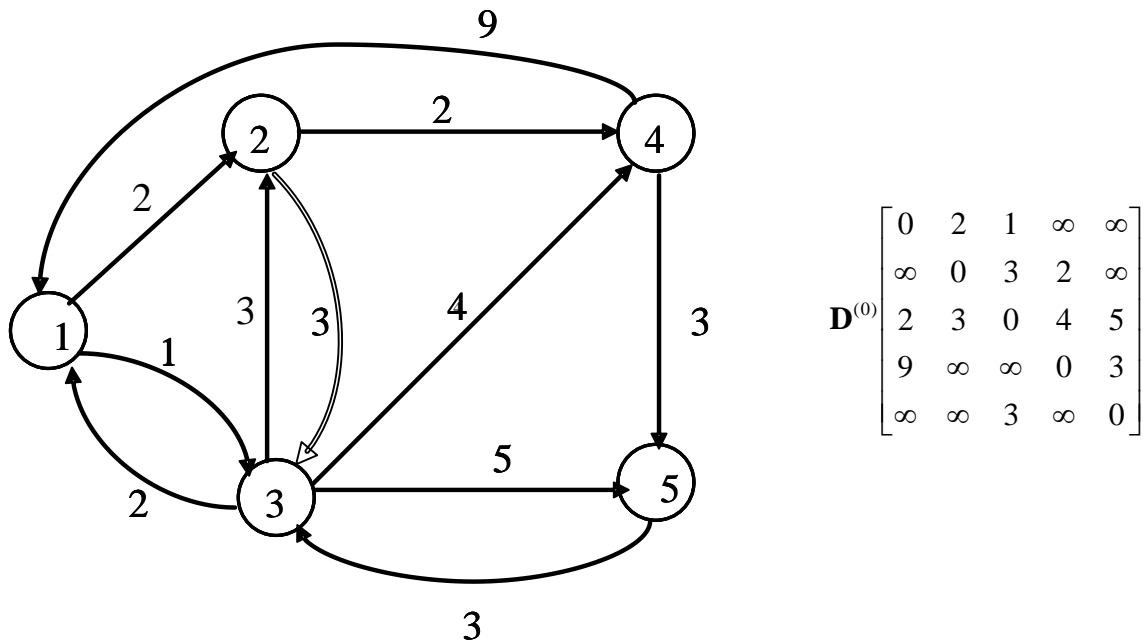
SP41: Határozzuk meg a $\mathbf{D}^{(k)} = (d_{ij}^{(k)})$, és az $\mathbf{R}^{(k)} = (r_{ij}^{(k)})$ elemeket a következőképp:

$$d_{ij}^{(k)} = \min(d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)})$$

$$r_{ij}^{(k)} = \begin{cases} r_{ik}^{(k-1)}, & \text{ha } d_{ij}^{(k-1)} > d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)} \\ r_{ij}^{(k-1)}, & \text{egyébként} . \end{cases}$$

SP42: Ha $k = K$, akkor készen vagyunk, egyébként $k = k + 1$ és menjünk SP41-re.

Az algoritmus végén $d_{ij}^{(K)}$ tartalmazza a P_{ij} út hosszát. Az útvonal az $\mathbf{R}^{(K)}$ mátrixból olvasható ki a következőképpen: a mátrix j -edik oszlopában lépkedünk, ha $r_{ij}^{(K)} = x$, ez azt jelenti, hogy az i -edik pontból az x pontba lépünk. A következő pontot $r_{xj}^{(K)}$ szolgáltatja, s így tovább, míg a j -edik ponthoz nem érünk.



2. ábra Hálózat megadása mátrixszal [83]

$$\mathbf{D}^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & \infty & \infty \\ \infty & 0 & 3 & 2 & \infty \\ 2 & 3 & 0 & 4 & 5 \\ 9 & \infty & \infty & 0 & 3 \\ \infty & \infty & 3 & \infty & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D}^{(5)} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & 4 & 6 \\ 5 & 0 & 3 & 2 & 5 \\ 2 & 3 & 0 & 4 & 5 \\ 8 & 9 & 6 & 0 & 3 \\ 5 & 6 & 3 & 7 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}^{(5)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 5 & 5 & 5 & 4 & 5 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 5 \end{bmatrix}$$

3. ábra A Warshall-algoritmus kiinduló mátrixai és végeredménye [83]

Az algoritmus három egymásba ágyazott ciklust tartalmaz, így az összes összeadások és összehasonlítások száma K^3 , mivel egy lépésben K^2 műveletet végzünk és $k = 1, 2, \dots, K$ -ra hajtjuk végre az SP41 módszert. Nagy méretek esetén a módszer a tárolásigényessége miatt kevésbé alkalmazható.

Bellman – Kalaba algoritmus – SP5

A másik mátrix módszer a dinamikus programozási elvvel dolgozik [31, 63]. A dinamikus elvet abban az értelemben használjuk, hogy egy út akkor a legrövidebb, ha minden részútja is az. Míg az előző módszer a pontok bevonásával keresett rövidebb utakat, itt rendre a legfeljebb 2, legfeljebb 3, ..., legfeljebb $(K - 1)$ élből álló legrövidebb utakat fogjuk meghatározni.

Általában $\mathbf{D}^{(k)}$ fogja tartalmazni az összes pontpár között azon legrövidebb utak hosszát, amelyek legfeljebb k élből állnak.

Az algoritmus lépései:

SP50: Legyen $k = 1$, $\mathbf{D}^{(1)} = (d_{ij}^{(1)})$, azaz

$$d_{ij}^{(1)} = \begin{cases} 0, & \text{ha } i = j \\ l_{ij}, & \text{ha létezik } (i,j) \text{ él} \\ \infty, & \text{ha nincs } (i,j) \text{ él} \end{cases}$$
$$r_{ij}^{(1)} = j, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

SP51: A $\mathbf{D}^{(k+1)}$ és az $\mathbf{R}^{(k+1)}$ mátrix elemeit a következőképpen határozhatjuk meg:

$$d_{ij}^{(k+1)} = \min_{1 \leq f \leq K} (d_{if}^{(k)} + d_{fj}^{(1)})$$
$$r_{ij}^{(k+1)} = \begin{cases} r_{ij}^{(k)}, & \text{ha nincs csere} \\ r_{if}^{(k)}, & \text{ha bevonjuk a } f \text{ pontot az útba.} \end{cases}$$

SP52: Ha $k = K - 1$, akkor készen vagyunk, egyébként $k = k + 1$ és menjünk SP51-re.

A módszer egyszerű, de viszonylag sok számolást igényel. Mivel minden lépésben az összeadások és a hasonlítások száma K^3 , így összesen K^4 lépést kell végrehajtani. Megmutatható azonban, hogy

$$d_{ij}^{(l+k)} = \min_{1 \leq f \leq K} (d_{if}^{(l)} + d_{fj}^{(k)}).$$

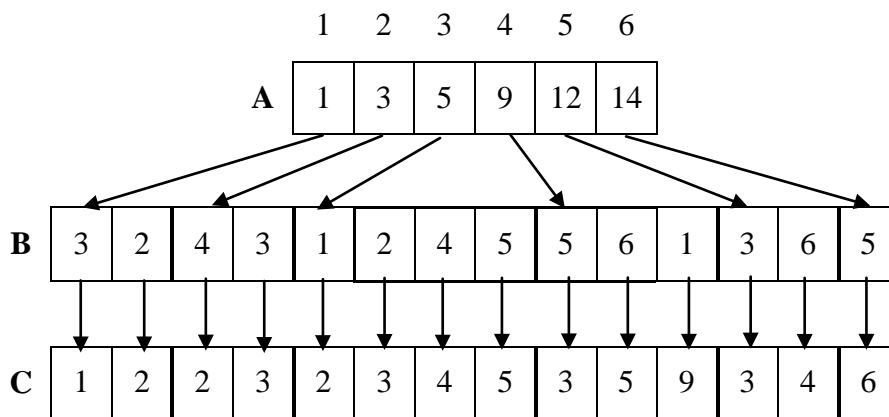
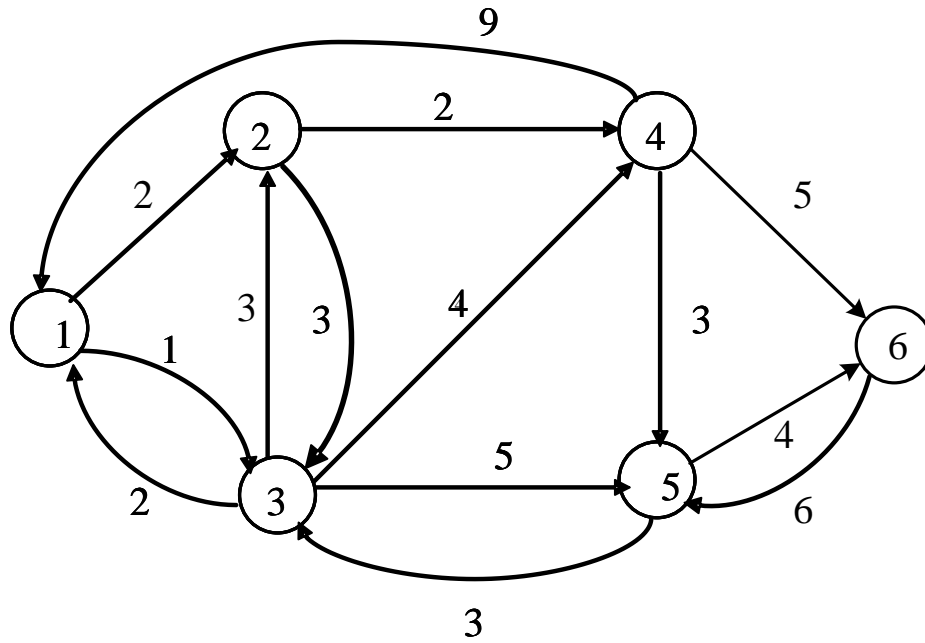
Ez azt jelenti, hogy nem szükséges minden mátrixot meghatározni, a leggyorsabb 2 hatványai szerint haladni, s így az eljárás csak $\log_2(K - 1) \cdot K^3$ lépést igényel.

1.5. *Javasolt eljárások ritka hálózatok esetén*

Az eddig ismertetett módszerek hibája az, hogy nem használják ki a közlekedési hálózatok speciális szerkezetét. Ezekre a hálózatokra az jellemző, hogy a pontok növekedésével egyre ritkábbak lesznek, mivel egy csomópontból átlagosan 3-4 él indul ki.

Az alábbiakban olyan eljárást ismertetek, amely nagyméretű hálózatok esetén optimális megoldást nyújt. Előtte azonban bemutatom a számítógépes megoldás szempontjából legjobb hálózattárolási lehetőséget. Az előző algoritmusoknál az élhosszakat általában mátrixban tároltuk, melynek helyigénye K^2 , s ritka mátrixok esetén is nagy helyet foglal el a memóriában. Ezért másik tárolási módszert javaslok. Itt a hálózat struktúrájának megadásához és a távolságadatokhoz összesen 3 vektor szükséges. Jelöljük ezeket **A**, **B**, **C**-vel. Az **A** mutató vektor, melynek a_i eleme azt mutatja, hogy az i -edik pontból kimenő élek végpontjai, illetve ezen élek hosszára vonatkozó adatok hol kezdődnek a **B** végpont-, illetve a **C** távolságvektorban. Az **A** vektor hossza K , a **B** és **C** vektorok hossza pedig L , így a hálózat tárolásához K^2 helyett $K + 2L$ hosszú tároló helyre van szükség. A tapasztalatok azt mutatják, hogy ez a tárolási mód a legtöbb feladtnál jól használható.

Az általam kidolgozott eljárás potenciálmódszer, Bakó András ötletét fejlesztettem tovább. Az eljárás kevesebb lépést igényel, mint az irodalomban ismertetett egyéb eljárások. Rendezzük az egy pontból kifutó éleket nagyság szerint a **C** vektorban. Mivel csak néhány él megy ki egy-egy pontból, így a **C** (és vele együtt a **B**) vektor elemeinek rendezése pontonként csak néhány összehasonlítást igényel. Ezután a hálózat minden pontjához rendeljünk hozzá egy további g_i elemet, amely az i pontból kimenő és a még minimális fában nem lévő élek legrövidebbikére mutat. Így lépésként minden $i \in S$ -re csak egy összeadást kell végezni. Az SP1 algoritmusban az S pontok halmazát a **D** potenciálvektor végignézésével kaptuk meg oly módon, hogy $i \in S$, ha $d_i \neq \infty$. Ehelyett most egy **M** listában tartjuk az S azon elemeit, amelyek az algoritmusban még szóba jöhetnek. Ez feleslegessé teszi a **D** potenciálvektor ismételt végignézését. Az **M** lista hosszát egy további f változóban, az **M** lista nullától különböző elemeinek számát pedig egy h változóban tároljuk.



4. ábra Hálózat megadása vektorokkal

Az így kapott SP6 algoritmus:

SP60: Legyen $m_1 = s$, $m_i = 0$ egyébként, $f = 1$, $d_s = 0$, $d_i = \infty$, $r_s = s$, $r_i = 0$,

$\mathbf{G} = \mathbf{A}$, $k = 1$, $h = 1$.

SP61: Legyen $y = d_u + c_v = \min_{\substack{i=m_i \\ m_i \neq 0}} (d_i + c_{g_i})$.

SP62: $g_u = g_u + 1$, $d_{b_v} = y$, $r_{b_v} = u$, $k = k + 1$;

ha $g_u = a_{u+1}$, akkor $m_u = 0$, $h = h - 1$, valamint $m_{f+1} = b_v$ és $f = f + 1$, $h = h + 1$.

Ha $g_i \neq v$ és $d_{b_{g_i}} < \infty$, akkor $g_i = g_i + 1$ és ha ekkor $g_i = a_{i+1}$, úgy $m_i = 0$, $h = h - 1$.

Ha $d_{b_{g_v}} < \infty$, akkor $g_v = g_v + 1$ és ha ekkor $g_v = a_{v+1}$, úgy $m_{b_v} = 0$, $h = h - 1$.

SP63: Ha $b_v = t$ (a. feladat), illetve $k \geq K$ (b. feladat) készen vagyunk, egyébként menjünk SP61-re.

A fenti eljárás előnye az SP1 módszerhez képest, hogy

- nem számoljuk ki az összes szóba jöhető élre az új potenciált, csak minden \mathbf{M} -beli pontból egy élre;
- az \mathbf{M} listán csak az aktuális S -beli pontok szerepelnek.

Az algoritmusban lépésenként h összeadást és összehasonlítást kell végezni, ahol h az $\mathbf{M} \subseteq S$ halmaz nullától különböző elemeinek száma.

A módszer továbbfejleszthető úgy, hogy minden lépésben egy vagy két összeadást, és ezen értékek egy már rendezett vektorban való elhelyezését kell elvégezni.

Legyen E_{ST} a lehetséges élek halmaza, azaz

$$E_{ST} = \left\{ (x, y) \mid x \in S, y \in T, (x, y) \in E, l_{xy} = \min_{z \in T} l_{xz} \right\}.$$

Az E_{ST} halmazbeli élek kezdőpontjait a $\mathbf{H1}$, végpontjait pedig a $\mathbf{H2}$ vektorok tartalmazzák. Az \mathbf{R} vektorban az ezen pontokhoz tartozó ideiglenes potenciálok szerepelnek. Az \mathbf{R} vektort nagyság szerint növekvő sorrendben rendeztük.

Az általam kidolgozott új algoritmus alap gondolata az, hogy az E_{ST} -beli élekre a potenciálokat csak a bekerüléskor határozzuk meg, így elkerüljük a lépésenkénti nagyszámú összeadást. Az E_{ST} halmaz lépésenként legfeljebb csak 2 éllel bővül, az egyik az éppen a minimális fába került él kezdő-, a másik pedig a végpontjából indul ki. Ezekre kiszámolva az ideiglenes potenciálokat, és összehasonlítva a már kiszámolt értékekkel, azonnal megkapjuk a fába bevonandó élt.

Az SP7 algoritmus leírása:

SP70: $S = s, T = V - s, r = \mathbf{B}(\mathbf{A}(s)), E_{ST} = (s, r), \mathbf{D}(s) = 0,$

$$\mathbf{H1}(1) = s, \mathbf{H2}(1) = r, \mathbf{R}(1) = l_{sr}.$$

Tételezzük fel, hogy az utolsó lépésben az (u, v) éllel bővítettük a minimális fát.

SP71: $E_{ST} = E_{ST} - \{(u, v)\} + \{(v, p), (u, q)\}$,

ahol $l_{vp} = \min_{j \in T} l_{vj}$, $l_{uq} = \min_{j \in T} l_{uj}$.

SP72: Számoljuk ki a p és q pontokhoz tartozó \bar{p} és \bar{q} ideiglenes potenciál értékeket:

$$\bar{p} = d_v + l_{vp}, \quad \bar{q} = d_u + l_{uq}.$$

SP73: Ha $p \neq q$, akkor rendezzük be az **R** vektorba a \bar{p} és a \bar{q} értéket, majd helyezzük el az u, v kezdő-, illetve a p, q végpontokat a **H1**, illetve a **H2** vektorba a megfelelő helyre.

Ha $p = q$, azaz az élek ugyanabba a pontba mutatnak, akkor az **R** vektorba $\min(\bar{p}, \bar{q})$, a **H1** illetve **H2** vektorokba pedig az u, v kezdő, illetve a p, q végpontok közül a megfelelő kerül be. Amennyiben $\bar{p} = \bar{q}$ is teljesül, akkor a kisebb sorszámú kezdőpontot válasszuk.

SP74: A (**H1**(1), **H2**(1)) él kerül a minimális fába, így elhagyjuk a **H1**, a **H2** és az **R** első elemét. **H2**(1)-et a T halmazból az S halmazba tesszük. **R**(1) már végleges potenciál, bekerül a **D** potenciálvektorba, $\mathbf{D}(\mathbf{H2}(1)) = \mathbf{R}(1)$; ún. sor adatszerkezetet használunk, **H1**, **H2** és **R** esetén, azaz léptetjük az elemeket.

SP75: Ha T üres, készen vagyunk, egyébként SP71-nél folytatjuk az eljárást.

Az SP7 algoritmus előnye a korábbiakkal szemben nyilvánvaló, a különböző vektorok kezelése azonban a program megírását bonyolultabbá teszi. Helyigénye $4K+2L+3k$, ahol k az E_{ST} halmaz maximális számossága ($k < K$).

1.6. A módszerek összehasonlító vizsgálata

Az alábbiakban összefoglalom az ismertett eljárásokkal kapcsolatos tapasztalataimat. Megvizsgáltam az egyes algoritmusokat a memóriaigény, a szükséges lépések száma, illetve a becsült futási idejük szempontjából. A módszereknél a hálózat minden pontjából kiinduló minimális hosszúságú utakra vonatkozó adatokat adjuk meg – ezért adataink eltérhetnek az algoritmusnál leírtaktól. Az SP6-SP7 algoritmusoknál az általunk javasolt, a 4. ábrán szereplő tárolási módszerre vonatkozó adatokkal dolgoztunk. Az első oszlop a hálózat tárolásához szükséges adatterületet, a második a program által használt munkaterületet mutatja. Az adatokat az 1. táblázat szemlélteti.

Algoritmusok	Adatok	Munkaterület	Lépések száma	
			Összeadáskor	Hasonlításokor
<i>SP1 Ford</i>	K^2	$2K$	$\frac{K^4}{2}$	$\frac{K^4}{2}$
<i>SP2 Dijkstra</i>	K^2	$2K$	$\frac{K^3}{2}$	$2K^3$
<i>SP3 D'Esopo</i>	K^2	$2K$	-	-
<i>SP4 Warshall</i>	K^2	K^2	K^3	K^3
<i>SP5 Bellman</i>	K^2	K^2	K^4	K^4
<i>SP6 Saját1</i>	$K + 2L$	$3K$	$\frac{K^3}{2}$	$\frac{K^3}{2}$
<i>SP7 Saját2</i>	$K + 2L$	$6K$	$(K - 1)(L - K)$	$(K - 1)(L - K)$

1. táblázat Legrövidebb út algoritmusok összehasonlítása

A tapasztalatok azt mutatják, hogy mind a tárolás, mind pedig lépésszám szempontjából ritka hálózatok esetén az utolsó kettőnek említett, az SP6 és az SP7 algoritmusok optimálisak, mivel figyelembe veszik a hálózat struktúráját és a Ford-Minty algoritmus sajátosságait is. Ez azt jelenti, hogy az $s \rightarrow t$ élek ideiglenes potenciálját eltároljuk, és minden lépésben csak egy összeadást és egy összehasonlítást kell végezni. Így az s, t pontokat elválasztó vágás élei helyett csak a belépő új él ideiglenes potenciálját kell meghatározni.

2. Forgalom ráterhelési - előrebecslési matematikai modellek

2.1. Forgalom-előrebecslési és -szétosztási eljárások

A tervezendő területet körzetekre osztjuk. Egy körzetbe azok az utcák, lakások kerülnek, amelyek közlekedés szempontjából homogénnek tekinthetők (ipartelep, alvó város, vegyes, stb....). Jelöljük az így kialakított körzeteket $1, 2, \dots, P$ -vel. A körzetek közti forgalmat az ún. honnan-hová mátrix (OD – Original–Destination) mátrix jelöli. A forgalomszétosztási feladatban a jelenlegi forgalmi és egyéb adatokból ennek a $\mathbf{H} = (h_{ij})$ honnan-hová mátrixnak a meghatározása a cél, melynek h_{ij} eleme az i -edik körzetből a j -edik körzetbe irányuló jelenlegi vagy jövőbeni forgalmat adja meg. Jelöljük a körzetek számát P -vel, ekkor a mátrix egy $P \times P$ típusú négyzetes mátrix lesz.

A feladat megfogalmazása attól függ, hogy milyen adatok állnak rendelkezésre. Általában ismert a körzetekből kiinduló és a körzetekbe befutó forgalom. Ezt a jelenlegi forgalomnál forgalomszámlálásból, jövőbeni forgalomnál az előrebecslés első lépcsőjéből, az ún. forgalomkeltési eljárásból kapjuk meg. Ebből kell meghatározni azt a forgalmi mátrixot, amelyre az i -edik sor összege az i -edik körzetből kiáramló, a j -edik oszlop összege pedig a j -edik körzetbe befutó forgalmat adja meg,

Rendszerint rendelkezésünkre áll egy $\mathbf{G} = (g_{ij})$ ún. „minta” mátrix, szintén $P \times P$ típusú négyzetes mátrix, a mért forgalmi mátrix, amelynek g_{ij} eleme az i -edik körzetből a j -edik körzetbe menő forgalmat jelenti. Jelölje a \mathbf{G} mátrix sorösszegeit o_1, o_2, \dots, o_p , melyek az $1, 2, \dots, P$ körzetek kiáramló forgalmát jelentik. Az $1, 2, \dots, P$ körzetekbe befutó forgalmakat, tehát a \mathbf{G} mátrix oszlopösszegeit jelöljük d_1, d_2, \dots, d_p -vel. Így az o_i, d_j értékekre teljesül:

$$o_i = \sum_{j=1}^P g_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, P, \quad (2.1)$$

$$d_j = \sum_{i=1}^P g_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, P. \quad (2.2)$$

Számítással, különböző terület-felhasználási adatok segítségével meghatározzuk körzetenként az előrebecslendő \mathbf{H} mátrixra az \bar{o}_i kimenő és \bar{d}_j befutó forgalmakat. Az \bar{o}_i és \bar{d}_j értékekre természetesen teljesülni kell a

$$\sum_{i=1}^P \bar{o}_i = \sum_{j=1}^P \bar{d}_j \quad (2.3)$$

feltételeknek. Az \bar{o}_i , \bar{d}_j értékek jelenthetik a jelenlegi tényforgalmat vagy a jövőbeni forgalom nagyságát. A feladat ezek után meghatározni azt a $\mathbf{H} = (h_{ij})$ forgalmi mátrixot, amelyre,

$$\sum_{j=1}^P h_{ij} = \bar{o}_i, \quad i = 1, 2, \dots, P, \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^P h_{ij} = \bar{d}_j, \quad j = 1, 2, \dots, P. \quad (2.5)$$

Bizonyos esetekben rendelkezésre áll a $\mathbf{C} = (c_{ij})$ költségmátrix, amelynek c_{ij} eleme az i -edik körzetből a j -edik körzetbe való utazás költségét jelenti. Mint a későbbiekben látni fogjuk, az előre megadott adatoktól függően a \mathbf{H} mátrixra a fenti feltételeken kívül továbbiakat is megadhatunk.

A honnan-hová mátrix nemcsak kikérdezés vagy a körzetek közötti forgalmak megállapítása alapján készíthető el, hanem keresztmetszeti forgalomszámlálás alapján is [65].

Hogy a forgalomszétosztás szerepét jobban lássuk, ki kell térnünk röviden a forgalom-előrebecslési folyamat felépítésének, az egyes lépések szerepének a bemutatására is. A forgalom-előrebecslési folyamat egyes lépései személyforgalom esetén a következők:

a) *Forgalomkeltés, -előrebecslés*

Az egyes körzetek kiinduló és beérkező forgalmának előrebecslése a vizsgált jövőbeli időpontra: az \bar{o}_i , \bar{d}_j értékek meghatározása. Itt célszerű közbülső lépcsőként a fajlagos (egy főre jutó) utazásszám becsléséből kiindulni. A fajlagos utazásszám becslése pedig leggyakrabban többváltozós – legtöbbször lineáris – regresszió-számítás segítségével történik. A változókat általában a körzetek szerkezeti mutatói – ún. városszerkezeti adatok –, pl. munkahelyek száma, kereskedelmi egységek alapterülete, átlagos háztartásméret, motorizációs szint, stb. adják.

b) *Forgalomszétosztás*

Erről a lépésről már szoltunk, s ennek változatait majd a következő részben vizsgáljuk, így itt most további részletezés nem szükséges.

c) *Közlekedési mód szerinti megosztás*

A forgalomszétosztás eredményeként kapott \mathbf{H} mátrix h_{ij} elemei a körzetek közötti összes utazásszámot jelentik. A közlekedési hálózat terhelésének vizsgálata és egyéb szempontok miatt ezeket az utazásszámokat fel kell még osztani közlekedési módok (közösségi közlekedés, egyéni közlekedés – személygépkocsis utak –, s esetleg kerékpár- és gyalogos közlekedés) utazás számaira. Ennek különböző heurisztikus módszerei vannak, amelyek a múltbeli megoszlási adatok – megoszlási görbék –, s a befolyásoló tényezők kapcsolatának számszerűsítésére, valamint a jövőben várható ez irányú fejlődésre (pl. motorizáció, parkolási lehetőségek, a gépkocsi használati szokások alakulása) támaszkodnak.

Sok esetben az előrebecslés első lépcsőjében a közlekedési mód szerinti megosztást, a forgalomkeltéssel együtt, egyszerűsítve hajtják végre.

d) *A forgalom hálózati elosztása, ráterhelés*

Ebben a lépésben történik meg az utazási mátrixok – külön a közösségi közlekedésre és külön az egyéni közlekedésre – hozzárendelése a közlekedési hálózathoz, a hálózat „terhelése”. A modellel kapcsolatban azt a hipotézist szokás feltenni, hogy az utazók az utazási költségük minimalizálására törekcsenek, azaz utazásukkor a leggazdaságosabb útvonalat veszik igénybe. Városi közlekedésnél az útvonal hosszának mérésénél az utazási idő a döntő tényező, ez pedig nyilván erősen függ a forgalom nagyságától. Ezért a forgalomterhelést több lépésben, a kapacitás-kihasználtsági fok figyelembevételével szükséges végrehajtani.

A forgalomszétosztás két fő típusa: a növekedési tényezős és a gravitációs modell.

A növekedési tényezős modelleknél a kiindulási mintamátrix elemeit különböző növekedési tényezőkkel való szorzás révén úgy korrigáljuk, hogy az eredményül kapott mátrix sor- és oszlopösszegei az előírt értékkel egyezzenek meg. Az egyes módszerek a növekedési tényező képzési módjában különböznek egymástól. A módszerek jelentős része olyan, hogy az egymás utáni iterációkban felváltva teljes sorokat és oszlopokat egységes növekedési

tényezővel módosítják, a növekedési tényező értéke pedig csak az illető sor, illetve oszlop sorszámától függ.

Ez esetben az eljárás konvergens – mint ezt majd látjuk –, és

$$h_{ij} = r_i g_{ij} s_j$$

alakú megoldás adódik, ahol az r_i , s_j tényezők az iterációkban alkalmazott növekedési szorzók szorzatának határértékei.

A gravitációs modell a mechanika Newton által megfogalmazott gravitációs törvényével analóg módon abból indul ki, hogy a két körzet közötti kölcsönhatás erőssége egyenesen arányos a körzetek lakosainak számával, és fordítottan arányos a közöttük levő távolság (utazási idő vagy költség) valamilyen növekvő függvényével (az eredeti megfogalmazásban négyzetével). Ennek az elvnek a forgalomszétosztásra való alkalmazásával, amikor a \mathbf{H} mátrix sor- és oszlopösszegei adottak, a következő alakú modellt szokták használni:

$$\begin{aligned} h_{ij} &= r_i f(c_{ij}) s_j, \\ r_i, s_j &\geq 0, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^P h_{ij} = \bar{o}_i, \quad i = 1, 2, \dots, P,$$

$$\sum_{i=1}^P h_{ij} = \bar{d}_j, \quad j = 1, 2, \dots, P, \quad (2.7)$$

ahol $f(c)$ egy monoton csökkenő függvény (ún. ellenállásfüggvény), c_{ij} pedig az i -edik és j -edik körzet közötti általánosított utazási egységköltség. Az $f(c)$ konkrét formájától függően különböző gravitációs modellek adódnak.

2.1.1. Növekedési tényezős modellek

Feltesszük, hogy ismert a $\mathbf{G} = (g_{ij})$ $P \times P$ méretű „minta” mátrix, az $\bar{\mathbf{O}} = (\bar{o}_i)$ ($i = 1, 2, \dots, P$) és a $\bar{\mathbf{D}} = (\bar{d}_j)$, ($j = 1, 2, \dots, P$) vektorok. A feladat annak a $\mathbf{H} = (h_{ij})$ mátrixnak a meghatározása, amelyre az (2.4) és a (2.5) feltétel teljesül, és amely a „minta” mátrixra bizonyos értelemben legjobban „hasonlít”.

A \mathbf{H} mátrix meghatározására növekedési tényezős modelleket használtak először. Ezeknél feltesszük, hogy a jövőbeni utazásszám a jelenlegi utazásszám különböző ún. növekedési

tényezőkkel való szorzásával adódik. Így a körzetek közötti utazási áramlatok arányairól feltételezzük impliciten, hogy azok a jövőbeni hálózatban a jelenlegihez képest nem változnak.

Ezért a növekedési tényezős modellek elsősorban rövid távú előrebecslésekre vagy a jelenlegi forgalom szétosztására használhatók, mivel nem veszik figyelembe a hálózat strukturális változásait [64, 70]. A \mathbf{H} mátrixot a legtöbb módszernél $\mathbf{H}^{(1)}, \mathbf{H}^{(2)}, \dots$ mátrixokkal történő iterációval határozzuk meg.

Minden iterációban a $h_{ij}^{(k)}$ elemet a $h_{ij}^{(k-1)}$ -ből egy $x_{ij}^{(k)}$ -val való szorzással kapjuk meg, azaz:

$$\begin{aligned} h_{ij}^{(1)} &= x_{ij}^{(1)} g_{ij}, \text{ és} \\ h_{ij}^{(k)} &= x_{ij}^{(k)} h_{ij}^{(k-1)} = \prod_{m=1}^k x_{ij}^{(m)} g_{ij}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

A módszerek abban különböznek egymástól, hogy az $x_{ij}^{(k)}$ elemeket milyen módon kapják meg. A legtöbb esetben x_{ij} helyett csak a sorra jellemző r_i és csak az oszlopra jellemző s_j -t keresünk, azaz azokat az

$$\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_p) \text{ és } \mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_p)$$

vektorokat, melyekre teljesülnek a következő feltételek:

$$\begin{aligned} r_i \left(\sum_{j=1}^P s_j g_{ij} \right) &= \bar{o}_i, \quad i = 1, 2, \dots, P, \\ s_j \left(\sum_{i=1}^P r_i g_{ij} \right) &= \bar{d}_j, \quad j = 1, 2, \dots, P. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Ekkor \mathbf{H} elemei a következőképp állnak elő:

$$h_{ij} = r_i g_{ij} s_j. \quad (2.10)$$

Globális tényezős modell

A globális tényezős modell egyetlen szorzótényezőt használ az összes körzetre. A jövőbeni forgalmat a jelenlegi forgalom globális faktorról való megszorzásával kapjuk. Az univerzális tényezőt és az előrebecsült forgalmat a következőképp számítjuk:

$$h_{ij} = \frac{\bar{w}}{w} g_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, P, \quad (2.11)$$

ahol

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^P \bar{o}_i, \quad w = \sum_{i=1}^P o_i.$$

Azonnal látszik, hogy a (2.11) eljárás az (2.4) és a (2.5) feltételt nem elégíti ki.

A fenti probléma kiküszöbölésére fejlesztették a módszert tovább. Ilyen továbbfejlesztett módszereket ismertetünk a továbbiakban.

Átlagtényezős modell

Az átlagtényezős modellben minden egyes körzethez növekedési tényezőt határozunk meg. Az i -edik körzetről a j -edik körzetbe menő forgalmat ezek után az i -edik és j -edik körzethez tartozó tényező számtani átlagának felhasználásával lehet számítani. Az i -edik körzethez tartozó tényezőt az \bar{o}_i / o_i hányados adja meg. A h_{ij} elem következőképpen határozható meg:

$$h_{ij} = \frac{1}{2} g_{ij} \left[\frac{\bar{o}_i}{o_i} + \frac{\bar{d}_j}{d_j} \right]. \quad (2.12)$$

A (2.12) eredményeként kapott \mathbf{H} mátrixra azonban az (2.4) és a (2.5) feltétel nem teljesül. Ezért célszerű a (2.12) eljárás helyett az alábbi iterációt alkalmazni [42]:

$$\begin{aligned} 0. \text{ lépés : } \quad h_{ij}^0 &= \frac{1}{2} g_{ij} \left[\frac{\bar{o}_i}{o_i} + \frac{\bar{d}_j}{d_j} \right], \\ k+1. \text{ lépés : } h_{ij}^{(k+1)} &= \frac{1}{2} h_{ij}^{(k)} \left[\frac{\bar{o}_i}{o_i^{(k)}} + \frac{\bar{d}_j}{d_j^{(k)}} \right], \end{aligned} \quad (2.13)$$

ahol

$$o_i^{(k)} = \sum_{j=1}^P h_{ij}^{(k)}, \quad d_j^{(k)} = \sum_{i=1}^P k_{ij}^{(k)}, \quad i=1,2,\dots,P, \quad j=1,2,\dots,P. \quad (2.14)$$

A fenti eljárásban az aktuális $\mathbf{H}^{(k)} = h_{ij}^{(k)}$ mátrix elemeit tovább módosítjuk az előre megállapított \bar{o}_i és a k -edik iterációban kapott $o_i^{(k)}$ elemek, valamint a \bar{d}_j és $d_j^{(k)}$ elemek felhasználásával. Így az eljárás mindinkább közeledik az $\bar{o}_i / o_i^{(k)} \approx 1$, illetve a $\bar{d}_j / d_j^{(k)} \approx 1$, feltételekhez ($i=1,2,\dots,P, j=1,2,\dots,P$). Megállási kritériumként az 1-5 %-os eltérés elérését szokták választani.

Fratar-modell

Az eredeti modellt Fratar 1954-ben Clevelandban (Ohio) alkalmazta és ennek a tapasztalatait publikálta [45]. Módszere az első két módszernek továbbfejlesztett változata, amelynek azonban a számítási igénye is megnőtt. Az i -edik körzetből a j -edik körzetbe menő jövőbeni forgalmat a jelenlegi forgalomból számítja, de figyelembe veszi az i -edik körzetből kimenő és a j -edikbe befutó forgalmat is. Minden körzetre meghatározza a kimenő és bemenő forgalomra jellemző növekedési tényezőt. Az i -edikből kimenő forgalomra jellemző tényezőt az alábbi összefüggés adja meg:

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^P g_{ij}}{\sum_{j=1}^P d_j g_{ij}} = \frac{o_i}{\sum_{j=1}^P d_j g_{ij}}. \quad (2.15)$$

Hasonló tényező adható meg a j -edik körzetbe beáramló forgalomra is:

$$s_j = \frac{\sum_{i=1}^P g_{ij}}{\sum_{i=1}^P o_j g_{ij}} = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^P o_j g_{ij}}. \quad (2.16)$$

Ezek után azt a feltételezéssel élünk, hogy az i -edik körzetből a j -edikbe menő előrebecsült forgalom egyenesen arányos az eredeti forgalommal, az i -edik körzetből kiáramló és a j -edikbe befolyó forgalom növekedési arányával, valamint az i -hez és a j -hez tartozó tényezők átlagával, azaz

$$h_{ij} = \frac{1}{2} g_{ij} \frac{\bar{o}_i \bar{d}_j}{o_i d_j} (r_i + s_j). \quad (2.17)$$

Az (2.15)-(2.17) képletek eredményeként kapott eljárásra az (2.4) és (2.5) feltétel nem teljesül, ezért az alábbi iterációs eljárást alkalmazzuk:

$$\begin{aligned} 0.\text{lépés: } h_{ij} &= \frac{1}{2} g_{ij} \frac{\bar{o}_i \bar{d}_j}{o_i d_j} (r_i + s_j), \\ k+1.\text{lépés: } h_{ij} &= \frac{1}{2} h_{ij}^{(k)} \frac{\bar{o}_i \bar{d}_j}{o_i^{(k)} d_j^{(k)}} (r_i^{(k)} + s_j^{(k)}), \end{aligned} \quad (2.18)$$

ahol

$$o_i^{(k)} = \sum_{j=1}^P h_{ij}^{(k)}, \quad d_j^{(k)} = \sum_{i=1}^P h_{ij}^{(k)},$$

és $B_j = \frac{\bar{d}_j}{d_j}, A_i = \frac{\bar{o}_i}{o_i}, B_j^{(k)} = \frac{\bar{d}_j}{d_j^{(k)}}, A_i^{(k)} = \frac{\bar{o}_i}{o_i^{(k)}}$ jelölés mellett

$$r_i^{(k)} = \frac{o_i^{(k)}}{\sum_{j=1}^P B_j^{(k)} h_{ij}^{(k)}}, \quad s_j^{(k)} = \frac{d_j^{(k)}}{\sum_{i=1}^P A_i^{(k)} h_{ij}^{(k)}}. \quad (2.19)$$

Megállási kritériumként ismét használhatjuk az $\bar{o}_i / o_i^{(k)} \approx 1$, illetve a $\bar{d}_j / d_j^{(k)} \approx 1$, ($i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, p$) feltételeket. Gyakorlatban jól bevált az $[r_i^{(k+1)} - r_i^{(k)}]$, illetve $[s_j^{(k+1)} - s_j^{(k)}]$ értékek vagy a $\max_{i,j} [h_{ij}^{(k+1)} - h_{ij}^{(k)}]$ érték kis küszöb alatt maradásának ellenőrzése is.

Detroit-i modell

A módszert a detroit-i városi forgalomszétosztásra használták először [32]. A modell megkísérelte a Fratar-módszer előnyeit átvéve egyszerűsíteni a bonyolult, sok számolást igénylő eljárást.

A Fratar-modellben levő, az i -edik körzetből kiáramló forgalomra jellemző r_i és a j -edik körzetbe bemenő forgalomra jellemző s_j tényezők helyett egyetlen faktort alkalmazott:

$$F = \frac{\bar{w}}{w}. \quad (2.20)$$

A feladatot az alábbi iterációval oldja meg:

$$\begin{aligned} 0.\text{lépés: } h_{ij}^{(0)} &= g_{ij} \frac{A_i B_j}{F}, \\ k+1.\text{lépés: } h_{ij}^{(k+1)} &= h_{ij}^{(k)} \frac{A_i^{(k)} B_j^{(k)}}{F^{(k)}} \quad k = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (2.21)$$

ahol
$$F^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^P \bar{o}_i}{\sum_{i=1}^P o_i^{(k)}}, \quad A_i^{(k)}, B_j^{(k)}, A_i \text{ és } B_j$$

pedig a Fratar-modellben megadott értékek.

A (2.4) és a (2.5) feltétel kielégítéséhez további kiegyenlítő számítások szükségesek.

Furness módszere

Az előző algoritmusokban minden lépésben új növekedési tényezőket határoztunk meg. A Furness-eljárás a sor- és az oszlopvektorokkal végez műveleteket addig, míg az eljárás a megoldáshoz nem konvergál.

Az iterációt az alábbi képletekkel adja meg:

$$1. \text{ lépés: } h_{ij}^{(0)} = g_{ij}, \quad h_{ij}^{(1)} = h_{ij}^{(0)} \frac{\bar{o}_i}{\sum_{k=1}^P g_{ik}},$$

közbülső lépés: ($k = 2m$ alakú)

$$h_{ij}^{(k)} = \frac{\bar{d}_j}{\sum_{s=1}^P h_{sj}^{(k-1)}} h_{ij}^{(k-1)}, \quad h_{ij}^{(k+1)} = \frac{\bar{o}_i}{\sum_{s=1}^P h_{is}^{(k)}} h_{ij}^{(k)}. \quad (2.22)$$

Az iteráció akkor ér véget, ha a (2.22) képletben a törtek értéke elég közel van 1-hez. Meg lehet mutatni, hogy a fenti $h_{ij}^{(0)}$ helyett tetszés szerinti pozitív számsorból kiindulva ugyanaz a megoldás adódik. A fenti eljárásban a 0. lépésben a sorösszegekből indulnak ki. Az iteratív eljárásban páratlan esetben a $h_{ij}^{(k+1)}$ mátrix sorainak összege \bar{o}_i -vel, páros esetben a $h_{ij}^{(k)}$ mátrix oszlopainak összege \bar{d}_j -vel egyezik meg. Ezért

$$\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P h_{ij}^{(k)} = \sum_{i=1}^P \bar{o}_i = \sum_{j=1}^P \bar{d}_j = \bar{w}. \quad (2.23)$$

Páratlan esetben a szorzófaktor – jelöljük r_i -vel – a következő:

$$r_i^{(k+1)} = \frac{\bar{o}_i}{\sum_{j=1}^P h_{ij}^{(k)}}. \quad (2.24)$$

Páros esetben a megfelelő $s_j^{(k)}$ szorzófaktor:

$$s_j^{(k)} = \frac{\bar{d}_j}{\sum_{i=1}^P h_{ij}^{(k-1)}}. \quad (2.25)$$

Ezért a megfelelő $h_{ij}^{(k)}$ és $h_{ij}^{(k+1)}$ elemek a következőképp néznek ki:

$$\begin{aligned} h_{ij}^{(k)} &= s_j^{(k)} h_{ij}^{(k-1)}, \\ h_{ij}^{(k+1)} &= r_i^{(k+1)} h_{ij}^{(k)}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

A növekedési tényezős modellek nem alkalmasak hosszú távú előrebecslésre, mert a hálózatszerkezetben időközben bekövetkező változásokat nem követik, és csak a kiinduló forgalmi jellemzőket használják.

A növekedési tényezős módszereket a tapasztalatok szerint a következő esetekben célszerű alkalmazni:

- a) olyan városok esetén, ahol a városszerkezet a jövőben alapvetően nem változik;
- b) rövid távú (legfeljebb 5 éves) előrebecslések esetén;
- d) „gravitációs és versengő lehetőségek” módszer alkalmazásakor kiegyenlítő számításokra (adott sor- és oszlopösszegek);
- e) olyan közúti modellek esetén, amelyekben hálózatmódosításra nem kell számítani.

A jelenlegi metodológia olyan esetben használja a modelleket, amikor a forrás-nyelő pont a tanulmányozandó területen kívül esik. Ilyenkor a megfelelő adatok csak arra a területre állnak rendelkezésre, amelyet vizsgálunk. Fontos viszont a környező területtel való forgalmi viszonyok jövőbeni alakulásának a megismerése is, amire néhány adat ismeretében egyszerű módszerrel lehetőség nyílik.

2.1.2. Gravitációs modellek

Még az 1800-as évek végén állapították meg azt az összefüggést Németországban, konkrét forgalmi adatok alapján, hogy két, vasútvonallal ellátott város közötti forgalom fordítottan arányos a városok közötti távolsággal (illetve inkább annak négyzetével) és egyenesen arányos a két város „nagyságával” – ami pl. a lakosság számával vagy a foglalkoztatottak számával jellemezhető. Képletben kifejezve:

$$h_{ij} = k \frac{o_i d_j}{c_{ij}^2}. \quad (2.27)$$

Ez az összefüggés teljesen analóg a Newton-féle gravitációs törvénnyel. Innen származik az elnevezés: gravitációs modell. A későbbiek folyamán a távolság hatását kifejező $\frac{k}{c_{ij}^2}$.

tényezőt az általános $f(c_{ij})$ „ellenállás”-függvénnyel helyettesítették, melyről általában csak azt tételezték fel, hogy monoton csökkenő függvény. A (2.27) képlet tehát így módosul:

$$h_{ij} = o_i f(c_{ij}) d_j . \quad (2.28)$$

Itt a c_{ij} már nemcsak távolságot, hanem utazási költséget, utazási időt is jelenthet – leggyakrabban több tényezőből összetevődő ún. általánosított utazási költség. A gravitációs modell alkalmazási köre az utóbbi 20 évben kibővült, az eredeti forgalom-előrebecslési feladat mellett egyes, a területi kölcsönhatásokkal összefüggő vizsgálatoknál is felhasználják, az ún. regionális tudomány keretein belül.

A körzetek közötti forgalmi áramlatok meghatározására szolgáló gravitációs modellnek – a körzetek kiinduló és beérkező forgalmára vonatkozó független becslések meglététől függően – a következő típusait lehet megkülönböztetni:

- korlátozó feltétel nélküli modell, melynél a \mathbf{H} mátrix sor-, ill. oszlopösszegeire nincs megkötés,
- kibocsátási oldalról korlátozott modell, melynél a sorösszegek adottak,
- forgalom-befogadó oldalról korlátozott modell, melynél az oszlopösszegek adottak,
- két oldalról korlátozott modell, melynél mind a sor-, mind pedig az oszlopösszegek adottak.

Legtöbbször a két oldalról korlátozott gravitációs modellt alkalmazzák, ha az ellenkezőjét külön nem emeljük ki, akkor mi is mindig erre gondolunk.

Az ellenállásfüggvény számos fajtája ismert. A leggyakrabban alkalmazott a negatív exponenciális függvény:

$$f(c) = e^{\alpha c} \quad (\alpha < 0). \quad (2.29)$$

További egyszerű és gyakori függvénytípusok:

$$\begin{aligned} f_2(c) &= c^\beta \quad (\beta < 0) \\ f_3(c) &= e^{\alpha c} c^\beta \quad (\alpha, \beta < 0). \end{aligned} \quad (2.30)$$

Egyéb bonyolultabb és esetleg több paramétert alkalmazó függvénytípusokra itt nem térünk ki. Az ellenállásfüggvényben szereplő paraméter (α, β, \sim ill. α és β) meghatározása a modell kalibrálásának feladata.

A (két oldalról korlátozott) gravitációs modell a következő feladat megoldását jelenti:

keresendők olyan $r_i, s_j > 0$ értékek, melyekre teljesül, hogy a

$$h_{ij} = r_i f(c_{ij}) s_j \quad (2.31)$$

értékek a mátrix sor- és oszlopösszegeire előírt feltételeket teljesítik:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^P h_{ij} &= \bar{o}_i, \quad i=1, \dots, P, \\ \sum_{i=1}^P h_{ij} &= \bar{d}_j, \quad j=1, \dots, P, \end{aligned} \quad (2.32)$$

ahol $f(c_{ij}) > 0$ ($i=1, \dots, P ; j=1, \dots, P$) megadott értékek.

Ismeretes (bizonyított), hogy ennek a feladatnak létezik megoldása, s a megoldás egyértelmű a h_{ij} értékekre, a Furness-féle iterációs módszer, s más hasonló, multiplikatív módszerek ehhez a megoldáshoz konvergálnak. Tehát, ha az ellenállásfüggvény paramétereit (vagy paramétereit) meghatározzuk, akkor ettől kezdve már a gravitációs modell megoldása egyértelmű (és a tapasztalatok szerint még elég nagy méretek mellett is számítástechnikailag viszonylag könnyen kivitelezhető).

2.2. Ráterhelési eljárások

A ráterhelés a közlekedéstervezési folyamatnak az a lépése, amikor az előzőekben meghatározott forgalmi igényeket terhelik rá a közlekedési hálózat egyes elemeire. A ráterhelési eljárások teremtik meg tulajdonképpen a kereslet és a kínálat összhangját. Itt rendelik hozzá a forgalmat az úthálózathoz. A feladat megoldásához szükséges:

- A forgalmi adatokat tartalmazó, úgynevezett célforgalmi mátrix, amelynek elemei a forgalomszétosztás során határozhatók meg. Itt az egyes körzetekből kiinduló és oda beérkező forgalmat még egy-egy csomópontba sűrítették össze.
- Közlekedési hálózat, az úthálózat gráfja – az algoritmusok általában csak az élek súlyozását engedik meg, a pontok súlyozását nem, ezért szükségessé válhat a

közlekedési hálózat transzformálása. Marton a csomóponti elágazást, az úgynevezett élkapcsolatot éleknek, az éleket pedig pontoknak feleltette meg [68].

- Útvonal választási preferenciákkal, az ún. legrövidebb vagy leggazdaságosabb útvonalak meghatározásával a disszertáció első fejezetében foglalkoztam.

A feladat matematikai megfogalmazása a következő:

Az úthálózat irányított gráf. Jelölje az úthálózat közlekedési csomópontjainak véges halmazát $V = \{1, 2, \dots, K\}$, az irányított útszakaszainak halmazát pedig $E = \{(i, j)\}, \|E\| = L$. Az úthálózatot tervezési szempontokból körzetekre osztjuk. Minden körzethez hozzárendelünk egy forrás- vagy nyelőpontot, esetleg mindkettőt. Jelölje a források halmazát S , a nyelőkét T , $\|S\| = p, \|T\| = q, p \leq K, q \leq K$. Forgalomszámlálásból vagy -előrebecslésből ismert a $\mathbf{H} = (h_{ij})$ forgalmi mátrix, melynek h_{st} eleme az s forráspontról a t nyelőpontra irányuló forgalmat mutatja. Az (i, j) élen átmenő x_{ij} forgalmat (folyamot) nem ismerjük. Jelölje x_{ij}^{st} az $s \in S$ forrásból a $t \in T$ nyelőbe menő forgalmat az (i, j) élen.

Az x_{ij} folyam az (i, j) élen az összes forrásból az összes nyelőbe menő forgalomból tevődik össze, azaz:

$$x_{ij} = \sum_{\substack{s \in S \\ t \in T}} x_{ij}^{st}. \quad (2.33)$$

Legyen $P_{st} = (s = i_0, i_1, \dots, i_r = t) = ((i_0, i_1), (i_1, i_2), \dots, (i_{r-1}, i_r))$ az s pontból a t pontba vezető út. Rendeljük a hálózat minden $(i, j) \in E$ éléhez egy l_{ij} élhosszat, egy $k_{ij}(x_{ij})$ egységnyi szállítási költséget és egy b_{ij} kapacitáskorlátot.

A P_{st} út $l(P_{st})$ hossza és a $k(P_{st})$ egységköltsége a következő:

$$l(P_{st}) = \sum_{(i,j) \in P_{st}} l_{ij}, \quad k(P_{st}) = \sum_{(i,j) \in P_{st}} k_{ij}(x_{ij}). \quad (2.34)$$

Az $x = (x_{ij})$ folyamot lehetséges folyamnak nevezzük, ha

$$0 \leq x_{ij} \leq b_{ij} \quad \text{és} \quad (2.35)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^{st} - \sum_{(i,j) \in E} x_{ji}^{st} = \begin{cases} h_{st}, & \text{ha } i = s \\ -h_{st}, & \text{ha } i = t \\ 0, & \text{egyébként.} \end{cases} \quad (2.36)$$

Az x folyam költségén, vagy másképpen a rendszer összköltségén a

$$K(x) = \sum_{(i,j) \in E} x_{ij} k_{ij}(x_{ij}) \quad (2.37)$$

mennyiséget értjük.

A P_{st} út szállítási költségét az alábbi összefüggés adja meg:

$$K(x) = \sum_{\substack{s \in S \\ t \in T}} K(P_{st}) \quad \text{és} \quad (2.38)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{\substack{s \in S \\ t \in T}} x_{ij}^{st}. \quad (2.39)$$

A forgalomelosztási feladat adott hálózati és forgalmi adatok alapján olyan lehetséges folyam meghatározása, amely bizonyos szempontból a legjobban lefedi a forgalmi szituációt. A forgalmi helyzetet két szempontból vizsgálhatjuk, az egyéni utazási szokások és az összes utazási költség (vagy ami ezzel megegyezik, az egy utazásra eső átlagköltség) szempontjából. Wardrop két elvet fektetett le a fentiekkel kapcsolatban [82]:

- I. Az utazás 2 pont között olyan utakon bonyolódik le, a melynek utazási költsége kisebb vagy egyenlő a pontokat összekötő, de utazásra fel nem használt utaknál.
- II. Az összes utazás összköltsége minimális.

Azon legkisebb költségű megoldást, ami az I. Wardrop elven nyugszik, egyéni optimálisnak, a II. elv alapján kapottat pedig rendszer optimálisnak nevezzük. Az elnevezés nyilvánvaló, ugyanis az egyén szempontjából az a jó, ha olyan úton megy, amelynek költsége a még igénybe vehető utaknál kisebb. A társadalom viszont olyan irányítási politikát igyekszik megvalósítani, amely az összes utazást tekintve a legalacsonyabb költségű.

A rendszer optimális feladat a következőképpen fogalmazható meg: határozzuk meg a (2.35) és a (2.36)-nek megfelelő $x = (x_{ij})$ lehetséges megoldást, amelyre (2.37) minimális. Az egyéni optimális és a rendszer optimális feladat megoldása a legtöbb esetben különböző, csak speciális esetben, lineáris célfüggvény esetén esik egybe.

Az egzakt matematikai megoldások a költségfüggvénytől és a kapacitáskorláttól függően vagy lineáris programozási, vagy maximális folyam problémára vezetnek. Nagyobb méretű hálózatok esetén azonban a matematikai programozási feladat idő és tárigénye akkora lehet, hogy helyette célszerűbb heurisztikus módszereket alkalmazni. Az alábbiakban összefoglalom a ráterhelés leggyakrabban alkalmazott alpmódszereit.

Egy utas, egy lépcsős eljárások – Mindent vagy semmit algoritmus

A legegyszerűbb és legkorábban használt eljárás azon a feltételezésen alapul, hogy a forgalom két pont között mindig egy, a leggazdaságosabb útvonalon bonyolódik le. Az eljárásban elegendő kiszámolni a minimális kifeszítő fát, s az így kapott utakhoz rendeljük hozzá a forgalmat. Az algoritmussal kapcsolatban felmerülő problémák:

- Hibás az alaphipotézis, mert az utasok jó része különböző megfontolások miatt nem a legrövidebb úton megy.
- A leggazdaságosabb útvonal a kiszámítás után az első lépésben megváltozhat, mivel a kifeszítő fán haladó utaknak közös részei is vannak, és az élköltség függ a rajta haladó forgalomtól.
- A módszer instabil, mert már minimális élköltség változás is az eredményben komoly módosulást okozhat.
- Az eredményül kapott megoldáshoz tartozó utazási összköltség lényegesen kisebb a valódi költségnél.
- Bizonyos élek forgalmát túlbecsüli, másokat pedig – ahol megoszló forgalom bonyolódna le – alábecsüli.

Egy utas, több lépcsős eljárások – kapacitáskorlátos eljárások

Ezt, és általában a többlépcsős eljárásokat kapacitáskorlátos eljárásoknak szokás nevezni. A módszer lényege, hogy a forgalmat nem egyszerre, hanem szakaszokban, lépcsőnként terheljük rá a hálózatra. Általában 3-5 lépcső a szokásos, azaz egyszerre a forgalom 20-33 %-át terheljük a hálózatra. Minden egyes lépcső után újra meghatározzák a legrövidebb, leggazdaságosabb útvonalakat, a következő lépcsőben pedig az újonnan meghatározott feszítő fákkal hajtják végre a ráterhelést. Ezzel a módszerrel figyelembe lehet venni az egyes útszakaszok kapacitását, mivel az útvonalak ellenállása az útvonal terheltségétől függően változik, amit megadhatunk grafikusán vagy analitikusan [35].

$$t_Q = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^\beta \right), \quad (2.40)$$

ahol t_Q utazási idő Q forgalomnagyság mellett,
 t_0 „szabad” utazási idő,
 Q forgalomnagyság (jármű/óra),
 Q_{\max} gyakorlati kapacitás (telítettség 75 %-a),
 α, β paraméterek.

A témával kapcsolatban különböző ellenállásfüggvényeket dolgoztak ki.

Több utas, egy lépcsős eljárások

Ezeknél a modelleknél is egy lépcsőben terheljük rá a hálózatra a forgalmat, tehát az útvonalak ellenállásának változtatására nincs mód, de itt egy útvonal nemcsak mindent vagy semmit kaphat, hanem akár részterhelést is. Ezeket az eljárásokat k. legrövidebb utas eljárásoknak vagy szimultán eljárásoknak nevezzük. Itt a két pont közötti forgalmat a szóba jöhető útvonalak között arányosan osztjuk fel. A legrövidebb útvonal kapja a legnagyobb terhelést, és minél hosszabb egy útvonal, annál kisebb terhelést kap. A terhelést az útvonalak hosszából képezett arányszámokkal hozzuk kapcsolatba. A leggyakrabban csak a két legrövidebb útvonallal foglalkozunk, mert a 3. stb. legrövidebb utak meghatározása nehézkes. A hosszabb szakaszra jutó terhelés meghatározásához az alábbi összefüggés alkalmazható:

$$F_{AB, \text{hosszabb}} = F_{AB} \cdot \left(\frac{0,5(q - q_{\max})}{1 - q_{\max}} \right), \quad (2.41)$$

ahol F_{AB} a teljes forgalom A és B pontok között,
 $F_{AB, \text{hosszabb}}$ a hosszabb útvonalra eső forgalom nagysága,
 q a hosszabb és a rövidebb útvonalak hosszainak hányadosa,
 q_{\max} a q hányados határértéke, ennél kedvezőtlenebb esetben a hosszabb útra nem terhelünk forgalmat.

Több utas, több lépcsős eljárások

Az alapmodellek közül a legösszetettebb eljárás. Lényege, hogy egyszerre több lehetséges útvonalat is figyelembe vesz, miközben ezek a lehetséges útvonalak akár lépcsőről lépcsőre változhatnak.

Minden ma használatos ráterhelési eljárás közös alapgondolata, hogy az utazók összköltsége, a választott útiránytól függetlenül minimális legyen. Az összes útvonalon közlekedő összes utazó összköltsége rendszerint csak több lépésben határozható meg, ezek az eljárások többnyire iterációs módszerrel dolgoznak.

A valóságban azonban nem mindenki ismeri az optimális utat, sőt, aki ismeri, sem biztos, hogy azon halad. Az útvonal-választások különbözősége a következőkre vezethető vissza:

- optimális útvonal ismeretének hiánya,
- megszokásból történő közlekedés,
- egyéb (pl. érzelmi) okok.

Ezen tényezők figyelembevétele érdekében fejlődtek ki az ún. sztochasztikus eljárások. Így a ráterhelési eljárásokat a következőképpen csoportosítjuk:

Nem sztochasztikus

- *Nem kapacitáskorlátos* – mindent vagy semmit, a korábbi egy utas, egy lépcsős eljárásnak felel meg.
- *Kapacitáskorlátos* – Wardrop-féle egyensúlyi elvre épülő eljárások, többnyire iterációval érik el a kívánt pontosságot.

Sztochasztikus

- *Nem kapacitáskorlátos* – egyszerű sztochasztikus, a több lépcsős, több utas ráterhelések csoportjába tartozik. Két alapváltozata ismert, a szimulációs alapú és a valószínűségi modell. A szimulációs eljárás lényege, hogy a gráf éleinek nincs konkrét ellenállásuk, hanem az ellenállásokat valószínűségi függvényekkel helyettesítjük, s ezeket az ellenállásfüggvényeket a ráterhelési eljárás minden lépcsőjében újra kiszámítjuk. A valószínűségi eljárás lényege, hogy a mindent vagy semmit eljárással ellentétben az egy pontból kiinduló forgalmat a pontból kiinduló összes útvonal között szétosztjuk.
- *Kapacitáskorlátos* – sztochasztikus egyensúlyi, a Wardrop egyensúlyra épülő eljárások sztochasztikus elemekkel történő kibővítései. Egyik legismertebb ilyen eljárás a lineáris approximációs eljárás.

A ráterhelési algoritmusok és a modellek részletes leírása [64, 67]-ben található meg részletesen. A közlekedéstervezés kérdéseivel [66] foglalkozik.

Nagy méretű dinamikus ráterhelési probléma megoldását írja le Ziliakopoulos [85] munkájában. A ráterhelési probléma egy másik megközelítését közli [36], ahol a forgalmi viszonyok meghatározásához a Frank-Wolfe algoritmust használja.

A közösségi közlekedési (tömegközlekedési) modellek esetén Horváth Balázs egy új, hatékonyabb eljárást dolgozott ki [59, 60, 61]. A modellek részletes kifejtését és egymásra épülését PhD disszertációjában írta le [58].

A tömegközlekedési hálózatok elemzésével és fejlesztésével a győri egyetemen egy jól képzett munkacsoport foglalkozik [74, 75, 76, 77].

3. Útburkolat gazdálkodási modellek

(Pavement Management System – PMS)

Az útburkolat-gazdálkodási rendszer (Pavement Management System) az útpályaszerkezetek távlati tervezésével, kivitelezésével, fenntartásával, állapotjellemezésével és kutatásával összefüggő tevékenységek átfogó, koordinált rendszerét jelenti. Eszközök és módszerek összessége, amelyek a döntéshozókat segítik abban, hogy olyan optimális stratégiákat válasszanak ki, amelyekkel az útpályaszerkezeteket meghatározott ideig üzemeltethető állapotban tartják. Szélesebb értelemben a közutak pályaszerkezetének létrehozásával és kezelésével kapcsolatos összes tevékenységet magában foglalja [47].

3.1. *Megoldási módszerek*

A fejezetben az útgazdálkodási eljárásokkal, a különböző típusú megfogalmazásokkal és a megoldási algoritmusokkal foglalkozunk. A feladat többféle szintű felvetése lehetséges: hálózati és projekt szintű modellek, egy vagy több időperiódussal foglalkozó modellek.

A **hálózati** szintű (network level) modelleknél az úthálózat egészével foglalkozunk. Az útszakaszokat a leromlás szempontjából kategóriákba soroljuk. A leromlás függ az útszakasz aktuális állapotától, a burkolat típusától, a szakaszon levő forgalom nagyságától. Az útszakaszokat ennek alapján halmazokba soroljuk. A modell az így kialakított halmazokra mondja meg, hogy a halmaz hány százalékaival milyen beavatkozást kell tenni. Hálózati szintű modellek esetén rendszerint kéttípusú megoldást vizsgálunk:

- Adott előírásnak eleget tevő beavatkozásokat hogyan tudjuk minimális költséggel megvalósítani – ez az úgynevezett Rendszer optimális feladat.
- Adott költségkorlát esetén a feltételeknek eleget tevő megoldások melyike a legelőnyösebb a közlekedőnek – ez az ún. Egyéni optimális feladat.

A **projekt** (létesítmény) szintű (project level) modell a hálózati szintű aggregált adatokat bontja le konkrét útszakaszokra történő beavatkozásokra. Míg a hálózati szintű feladat csak azt mondja meg, hogy adott állapotú, forgalmi kategóriájú és burkolattípusú utak halmazával milyen százalékos megosztásban és milyen beavatkozást kell végezni, addig a projekt szintű modellben konkrétan meghatározzuk, hogy melyek azok az útszakaszok, amelyeken egy adott

típusú beavatkozást el kell végezni. Olyan projekteket határozunk meg, amelyek megfelelnek a hálózati szintű feladat megoldásának.

A **program** szintű (task level) modell abban különbözik a projekt szintű modelltől, hogy itt a projekt szintű modellben meghatározott szakaszokra elvégzi a tényleges ütemezést. Meghatározza, hogy az egyes beavatkozásokat pontosan milyen sorrendben, mikorra kell elvégezni.

Időperiódus szerint foglalkozhatunk rövid vagy hosszú távú, egy vagy több periódusos modellel. Egy periódusos modell esetén az optimális beavatkozási politikát rögzített időintervallumra adjuk meg. Több periódusos modell esetén az adott perióduson belül előírt időintervallumokra adjuk meg az optimális beavatkozást.

A feladat megoldási eljárása függ a rendelkezésre álló adatoktól, a kitűzött céltól. A megoldás több fázisból áll:

- Alapadatok gyűjtése és kezelése.
- Az útszakaszok állapotfelvétele szemrevételezéssel és mérésekkel.
- A PMS modell felállítása, a célok kitűzése.
- A feladat megoldása.
- Költségelemzés, korrekciók, a feladat véglegesítése.
- Több időperiódus figyelembevétele.

A folyamat sematikus felépítését az 5. ábra mutatja.

A megoldási módszerek fontosabb csoportjai a következők:

- heurisztikus eljárások,
- optimalizációs módszerek,
- szakértői és egyéb rendszerek,
- az előbbi módszerek kombinációi.

A heurisztikus eljárások az útszakaszokat minősítő paramétereik alapján csoportokba, halmazokba osztják, majd különféle megfontolások alapján az így kialakított halmazokat rangsorolják. A módszerrel általában – egy vagy több periódusú – projekt szintű modellt oldunk meg, de hálózati szintű alkalmazás is elképzelhető.

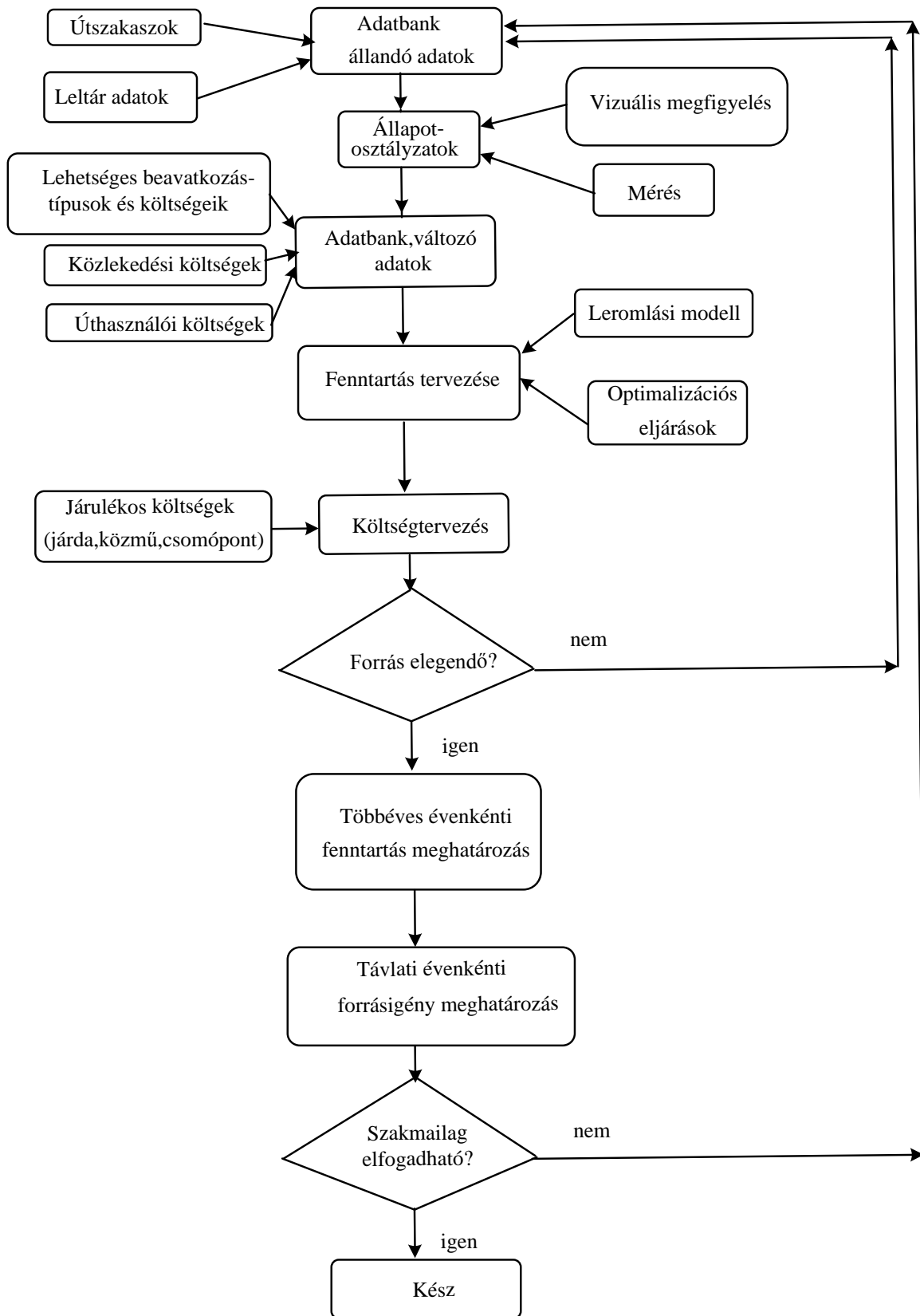
Az optimalizációs eljárások a heurisztikus eljárásokkal szemben valamilyen operációkutatási modellen nyugszanak. Általános jellemzőik, hogy:

- a) adott egy vagy több feltétel, amit a megoldásnak ki kell elégítenie;
- b) adott egy célfüggvény, aminek a megoldás eleget kell, hogy tegyen.

A feltételeknek eleget tevő megoldások az úgynevezett lehetséges vagy megengedett megoldások, a célfüggvényt is kielégítő megoldást (vagy megoldásokat) pedig optimális megoldásnak nevezzük. Hálózati és projekt szintű feladat megoldására egyaránt alkalmazható.

Ha kevés adatunk van, vagy az adatok nem elég megbízhatók, akkor szakértői rendszerek alkalmazására van szükség. Ezek egyéb esetben is alkalmazhatók.

A fejezetben ismertetjük az úthálózat karbantartásával foglalkozó legfontosabb modell típusokat.



5. ábra Többéves hálózati PMS folyamatábrája

3.2. *Heurisztikus modellek*

Először a feladat feltételeit kielégítő ún. lehetséges megoldást, de nem pontos optimumot szolgáltató heurisztikus módszereket foglaljuk össze. Ezeket a módszereket világszerte alkalmazzák a feladat megoldására. Hazánkban is születtek ilyen eljárások. Ebbe a csoportba tartozik többek között a városi úthálózatra vonatkozó PMS megoldása [27] vagy a gyorsforgalmi úthálózatra vonatkozó PMS [4].

A heurisztikus módszerek rendszerint rangsoroló eljárások, a megfogalmazott cél(ok) figyelembevételével az útszakaszokat rangsorolják. Ez a rangsor adja meg a beavatkozások fontossági sorrendjét. A szakirodalomban gyakran beszélnek optimális megoldásról abban az esetben is, amikor a megoldás matematikai értelemben nem biztos, hogy optimális. Az optimális beavatkozási sorrend kialakításához figyelembe vett elvek nem matematikai modellek, hanem mérnöki megfontolásokon alapulnak.

A heurisztikus eljárások egy vagy több útjellemző alapján dolgoznak. A modell – attól függően, hogy milyen időszakot veszünk figyelembe – lehet egyéves vagy hosszabb időszakra vonatkozó. Mindkét esetben szükséges megfelelő leromlási modellt is alkalmazni. Ezt vagy leromlási függvénnyel vagy Markov-féle átmeneti valószínűség mátrixszal adjuk meg. A hosszabb időperiódusú modell esetén szóba jöhet az egész távra vonatkozó terv vagy évenkénti tervek készítése. A heurisztikus modellek általános jellemzője, hogy valamely rögzített (vagy több minősítő paraméter esetén több) küszöbértéket adunk meg, amely alapján a figyelembe veendő útszakaszokat két részre osztják. Az egyik a megfelelő küszöbérték alatti utak halmaza, amelyre valamilyen beavatkozást kell végezni. A másik halmazba a küszöbérték feletti utak kerülnek, amelyeken beavatkozás nem szükséges. A kitűzött célt tekintve a következő típusú feladatok megoldására szokták a módszert alkalmazni:

- útállapot-javítási eljárások illesztése megadott utakhoz,
- megadott költségkorlátot figyelembe vevő útállapot-javítási eljárások meghatározása,
- útállapot-javítások ütemezése,
- többperiódusú modellek esetén az évenkénti javítások meghatározása,
- költségkorlátok miatt a következő évre áthúzódó feladatok kezelése.

A módszerek összefoglalását [24] közli részletesen.

3.2.1. Éves tervek készítése

Rövid távú modell, éves tervek esetén a megadott minősítő paraméter(ek) alapján minden útburkolat-állapotra meghatározzuk a rangsort. Mérnöki, szakértői megfontolások alapján útosztályonként meghatározzuk ehhez az állapothoz, burkolattípushoz, forgalmi kategóriához tartozó küszöbértéket. A sorrendek alapján megkapjuk a küszöbérték alatti utak halmazát. Ezeket az útvonalakon kell az adott évben beavatkozást végrehajtani. A modellben ismert az egyes útosztályon belüli útszakaszok hossza és területe, továbbá az útállapottól függő, különböző típusú beavatkozások fajlagos költsége is.

A sorba-állításra különböző paramétereket alkalmazhatunk:

- kombinált útállapot mutató (pl. Pavement Condition Index – PCI),
- kiválasztott útállapot-jellemző (pl. nyomvályú-mélység),
- útállapot, baleset, forgalom,
- aktuális nettó érték,
- várható haszon/költség értéke,
- egyéb kombinált mutató.

Az eljárás során minden említett kategóriára meghatározzuk a küszöbérték alatti útszakaszok halmazát. A következő lépésben a javítandó útszakaszokhoz – minőségszintjüktől függően – a beavatkozás (javítás) típusát kiválasztjuk. A fajlagos költségek alapján az összes beavatkozás költsége számítható.

Két lehetőség van:

- a) az elkészített terv összköltsége nem haladja meg a rendelkezésre álló K költségkeretet,
- b) a terv által meghatározott költség meghaladja a rendelkezésre álló, előírt költségkeretet.

Az a) esetben az elkészített terv elfogadható, az esetlegesen fennmaradó pénzből javíthatjuk a küszöbindex feletti állapotú utakat, ezzel a teljes úthálózat minőségét javítva, vagy a javítandó útszakaszoknál igényesebb, költségesebb – így hosszabb ciklusidejű, hatékonyabb – beavatkozásokat végezhetünk.

Ha a b) eset következik be, azaz – mint általában – a rendelkezésünkre álló összeg kevesebb az igényelnél, akkor a tervezett beavatkozásokból egyeseket kénytelenek vagyunk elhagyni, a beavatkozási költségeket addig csökkenteni, amíg a rendelkezésre álló költségkeret szempontjából is végrehajtható tervet kapunk. Ez vagy bizonyos útszakaszokon tervezett beavatkozások kihagyásával, azok következő évre történő átütemezésével vagy pedig a korábban előirányozottnál igénytelenebb, olcsóbb beavatkozások kiválasztásával érhető el. Mindkét esetben az úthálózat általános minősége romlik.

Ennek a romlásnak a számszerűsítéséhez meg kell határozni egyes közlekedési egységköltségeket is. Ezek az útállapottal, a forgalom nagyságával függenek össze, ilyenek például az utazási idő, gumiabroncskopás, üzemanyag- és kenőanyag-fogyasztás költsége, stb. Ismernünk kell továbbá egyéb, az úthálózat állapotával összefüggő költségeket is, pl. baleseti költségek, stb.. Ezek segítségével meghatározhatjuk az úthálózat egyes beavatkozási tervvariánsaihoz tartozó olyan költségeket, amelyek arra vonatkoznak, mennyibe kerül az úthasználónak, ha a szükséges karbantartási K költségkeret helyett csak egy $K_1 < K$ költségkeret áll rendelkezésünkre.

Az alábbiakban vázolunk egy heurisztikus eljárást az útállapot-gazdálkodás megoldására. Tételezzük fel, hogy az i -edik útosztályban az M útállapot jellemző paraméter szerint a küszöbérték M_i . Az útosztályok száma legyen G . Az i -edik útosztályba tartozó, az M útállapot szerint homogén, összefüggő útszakaszok halmazát jelölje $H_i = (h_{1i}, h_{2i}, h_{3i}, \dots, h_{ni})$. Jelölje ezen utakhoz tartozó útállapot-jellemzőket rendre $m_{1i}, m_{2i}, \dots, m_{ni}$. Tételezzük fel, hogy ezen értékek már csökkenő sorrendbe rendezettek, azaz

$$m_{1i} > m_{2i} > \dots > m_{ni} \quad (3.1)$$

A h_{ji} szakaszokhoz mérnöki megfontolások alapján meghatározzuk a szükséges beavatkozásokat. Jelölje a j -edik útszakaszhoz tartozó, egységnyi területre vonatkozó beavatkozási költséget c_{ji} , a szakasz területét pedig t_{ji} , ($j = 1, 2, \dots, n$). A beavatkozás költsége a fenti jelölésekkel $k_{ji} = c_{ji} \cdot t_{ji}$.

Az algoritmus lépései:

1. Minden i útosztályra ($i = 1, 2, \dots, G$) meghatározzuk az M_i küszöbértéket.
2. Lerendezzük minden i útosztályra a H_i halmazt.

3. Minden i útosztályra meghatározzuk azt az l_i indexet, amelyre

$$m_{l_i} \leq M_i \quad (3.2)$$

Jelölje a fentiek szerint kiválasztott részhalmazt H_{l_i} .

4. Kiszámoljuk a

$$K_i = \sum_{j=l_i}^n c_{ji} t_{ji}, \quad i = 1, \dots, G \quad (3.3)$$

értékeket, majd meghatározzuk a beruházás összköltségét

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^G K_i \quad (3.4)$$

5. Amennyiben $\bar{K} \leq K$, akkor lehetséges beavatkozási programot kaptunk. Ha a feltétel nem teljesül, akkor a korábban ismertetett redukciós eljárások valamelyikét kell alkalmaznunk egészen addig, míg a feltételt el nem érjük.

3.2.2. Többéves terv készítése

Az előzőhöz hasonló módon, itt is sorba-állítás segítségével határozzuk meg a sorrendet. Az eljárásnál a leromlási folyamatot is figyelembe vesszük. Így minden évre adódik az az útszakasz-halmaz, amit javítani kell.

Legyen a tervezési periódus T év. Az eljárás az $1, 2, \dots, T$ évekre megadja a H_1, H_2, \dots, H_T útszakasz-halmazt, amelyeken be kell avatkozni. Jelölje a rendelkezésre álló pénzügyi keretet az egyes években K_1, K_2, \dots, K_T , a karbantartáshoz szükséges összeget pedig $k(H_1), k(H_2), \dots, k(H_T)$.

Ha a $k(H_i) \leq K_i$, $i = 1, 2, \dots, T$ összefüggés fennáll, akkor a fenti ütemezési politika végrehajtható. Ha a fenti feltétel nem teljesül, akkor a tervet iterációval tudjuk meghatározni:

1. Meghatározzuk a $\bar{H}_1 \subset H_1$ halmazt, amire $k(\bar{H}_1) \leq K_1$;
2. előállítjuk a $H_1 - \bar{H}_1$ és a H_2 halmazból azt a \bar{H}_2 halmazt, amire a beruházási költségkorlátozás $k(\bar{H}_2) \leq K_2$ fennáll.

Az eljárást addig folytatjuk, amíg a $\overline{H_T}$ -t meg nem kapjuk. Ha $H_T - \overline{H_T} \neq \emptyset$, akkor a tervperiódus végére is marad olyan úthalmaz, amelyre a javítást el kellett volna végezni, de elegendő pénzügyi forrás hiányában nem kerülhetett rá sor.

Az évenkénti elmaradásból származó költséget – hasonlóan, mint az éves tervnél – itt is ki lehet számolni. Így minden tervvariánshoz megkapjuk a beavatkozás hasznát, illetve a beavatkozás elmaradása miatt jelentkező többletköltséget is.

3.2.3. OPMS eljárás

Hazánkban készült néhány program a heurisztikus módszer alkalmazására. Ezek egyike a közúthálózatokra készített, egyszerűsített projekt szintű PMS modell [26]. A modell megadja a beavatkozások százalékos összetételét is, így hálózati szintű kérdésekre is választ ad.

Az út állapotának minősítésére két paramétert, – felületállapotot és egyenetlenséget – választottak. Ezenkívül az út állapotával közvetetten összefüggő paramétereket, – mint például víztelenítés, forgalmi adatok, terepjelleg – is figyelembe vehet.

A beavatkozásoknál a rutinszerű fenntartástól kezdve egészen a többretegű erősítésig összesen öt technológia-csoportot vesz figyelembe, amelynek a fajlagos költségei az útállapotoktól függetlenül állandók. A beavatkozási egységköltség azonban függ a forgalomnagyságtól, a burkolattípustól, a szakaszjellegtől (átkelési, illetve külsőségi), stb. Hipotézisként felteszi, hogy a különböző útállapotokhoz egyértelműen gazdaságilag hatékony beavatkozás-típus tartozik. Egy beavatkozás-típus azonban többféle technológiával is elvégezhető.

Az alkalmazott eljárás a következő:

- A megadott paraméterek alapján egy halmazba gyűjti a homogénnek tekinthető útszakaszokat.
- Az ugyanolyan minőségű szelvény-folytonos szakaszokból ún. Projekteket, beavatkozási munkaszakaszokat képez.
- Az így kapott Projekteket a leromlási folyamatra jellemző paraméterek alapján csoportba sorolja.
- Meghatározza a szükséges beavatkozás-típust és kiszámolja az összes beavatkozás költségét.

Az eljárásban a beavatkozás küszöbértékei változtathatók, ezzel elérhető az, hogy megvalósítható akciótervet dolgozzunk ki. Ez a beavatkozások összességét tartalmazó olyan terv, amelyben a beavatkozások összköltsége nem haladja meg a rendelkezésre álló költségkeretet. Továbbá arra is van lehetőség, hogy a műszaki, forgalombiztonsági szempontból szükséges teljes beavatkozási költséget meghatározza, és a fedezethiányra megállapítsa a hitelként felveendő összeget, a szükséges műszaki indoklással együtt.

3.2.4. APMS modell

Az OPMS modell a gyorsforgalmi utak speciális igényeinek kielégítésére nem volt alkalmas, ezért szükségessé vált ezeket az igényeket kielégítő modell kidolgozása. A létrehozott modell két feladatot teljesít:

- egyrésztől kiszolgálja és finomítja a teljes gyorsforgalmi úthálózaton végzett értékeléseket,
- másrésztől támogatja a létesítményi (projekt) szintű útkezelést.

A kínálgózó két lehetőség – teljes optimumot szolgáltató optimalizációs modell, illetve a mérnöki megfontolásokon alapuló rangsoroló eljárás – alkalmazása közül az utóbbit választottuk. Az első modell választása esetén ugyanis a viszonylag kis összhosszúságú hálózat fenntartási-kivitelezési szempontból kezelhetetlen kis részekre esett volna szét. Eszerint 25 éves hosszúságú időszakra meghatározzuk a műszaki-gazdasági szempontból legkedvezőbbnek tartott beavatkozássort és ezek költségeit. Ezt összes költségük és hasznuk szempontjából összevetjük azzal a megoldással (beavatkozás-kombinációval), amelyet forráshiány esetén alkalmazunk. Ezt minden útszakaszra elvégezve a haszon/költség tényezők a szakaszokhoz tételesen hozzárendelhetők. Ezeket sorba rendezve a beavatkozások fontossága rangsorolható. A teljes éves bekerülési költség adja a legkedvezőbb megoldás éves forrásigényét. Ha ennél kevesebb forrás (anyagi eszköz) áll rendelkezésre, akkor meghatározhatók a rendelkezésre álló forrásból megvalósítható munkák, valamint a forráshiányból adódó veszteségek.

A mérnöki rész kidolgozását, illetve a modell elvi megfogalmazását Gáspár László és Bakó András végezte [7, 29]. A számítógépre alkalmazható algoritmus kidolgozását és a programrendszer szervezését én készítettem [4, 6]. A modellről részletesen az értekezés 4. fejezetében írok.

3.3. Optimális úthálózat-fenntartás meghatározása

A továbbiakban az optimalizációs eljárásokkal megfogalmazott modelleket ismertetjük. Ezek a heurisztikus eljárásokkal szemben megadják a feltételeknek eleget tevő leggazdaságosabb megoldást. Ezek a módszerek a DSS (Decision Supporting Systems – Döntés támogató rendszerek) kategóriájába tartoznak. Azaz a megadott feltételek változtathatók, így többféle megoldásból választhat a döntéshozó. A módszereket azonban nem lehet egyedül alkalmazhatónak tekinteni, ugyanis a feltételeket kielégítő megoldás nem mindig létezik, illetve a modellhez szükséges adatok nem állnak mind rendelkezésre, így már a modell megfogalmazásánál is kompromisszumot kell kötnünk.

Optimalizációs eljárások esetén a teljes vizsgált úthálózattal egyszerre dolgozunk. Olyan megoldást keresünk, amely:

- eleget tesz bizonyos feltételeknek,
- kielégíti az optimalitási kritériumot.

Az előírt feltételek különbözők lehetnek. Projekt szintű modell esetén egyszerre egy útszakasról vagy egy útszakasz-halmazról döntünk, azon milyen beavatkozásra kerüljön sor és milyen ütemezésben. Ebben az esetben a feltételek között szerepel az egészértékűség, így ez egész értékű (integer) programozáshoz vezet (Ilyen eljárást használ a HDIII-modell optimalizációs eljárása [25]). Az egészértékűség azonban nagyban csökkenti a megoldható feladat méreteit. Más modellek lineáris programozásra vezetnek (Ilyen az USA-ban kidolgozott PAVER programcsomag, a finn HIPS-modell [48] és az első hazai hálózati szintű modell is [26]). A feladat egyéb módszerekkel is megoldható. Gyakran használják a közelítő megoldást szolgáltató dinamikus programozási eljárásokat, ill. a gradiens módszert.

3.3.1. Egészértékű modellek

Az egészértékű (integer) modellek egy útszakasz, illetve homogén útszakaszcsoport esetén adnak döntési lehetőséget a beavatkozás jellegére. Jelölje az útszakaszok halmazát $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, a lehetséges beavatkozások halmazát pedig $H = \{h_1, h_2, \dots, h_p\}$. A modell megfogalmazásához adjuk meg a haszonfüggvényt, a beavatkozás költségét és a rendelkezésre álló költségkeretet. A modell többperiódusos változatát írjuk le az alábbiakban. Legyen a periódusok száma T , tekintsük az $e \in E$ útszakaszt, a $h \in H$ beavatkozást és a t . évet.

Vezessük be a következő jelöléseket:

- b_{eht} jelölje az e . útszakaszon a h . beavatkozás társadalmi összhasznát a t . évben (közúti baleseti költség csökkenése, környezetvédelmi előnyök, stb..),
- B_t a fenntartásra fordítható összeg a t . évben,
- k_{eht} a beruházás költsége az e . szakasz, a h . beavatkozási politika esetén a t . évben,
- x_{eht} jelölje a meghatározandó ismeretlent, melynek értéke 1, ha a t . évben végrehajtjuk az e . útszakaszon a h . beavatkozást, egyébként értéke 0.

A cél minden e, h, t , esetére olyan megoldást határozni meg, amelyre:

- az évenkénti költségkeretet nem haladjuk meg,
- és a társadalmi összhaszon maximális.

A célfüggvény ennek megfelelően a következő:

Határozzunk meg olyan megoldást, amelyre a célfüggvény maximális, azaz

$$\sum_{e \in E} \sum_{h \in H} \sum_{t=1}^T x_{eht} b_{eht} \rightarrow \max! \quad (3.5)$$

Az \mathbf{X} megoldásvektor egész értékű, azaz

$$x_{eht} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, e \in E, h \in H, t = 1, 2, \dots, T \quad (3.6)$$

Emellett az összes beruházási költség évenként a megadott költségkeretet nem haladja túl, azaz

$$\sum_{e \in E} \sum_{h \in H} k_{eht} x_{eht} \leq B_t, t = 1, 2, \dots, T \quad (3.7)$$

Az integer modelleknek több variánsa is ismeretes: útszakaszonként megadva a beavatkozásokat, a területet zónákra osztva a beruházási keret zónánkénti megadásával, éves kamatláb vagy inflációs ráta figyelembevételével, stb.

3.3.2. Lineáris programozási modell

Míg az egészértékű programozási modellekben egy útszakasz egészével végzünk valamilyen műveletet – ami a projekt szintű modelleknél általában természetes követelmény –, addig a hálózati szintű modellek esetén általában más a helyzet.

Egy bizonyos úttípus azonos forgalmi kategóriába tartozó és rögzített állapotú szakaszait egy halmazba egyesítjük. Jelölje s az úttípust, f a forgalmi kategóriát és r az útállapotot (ez lehet az útállapot-index vagy több paraméterrel leírható állapotkép). A rendelkezésre álló hálózatból gyűjtsük ki azon (a,b) szakaszokat, amelyek az s úttípusba, f forgalmi kategóriába, r útállapotba tartoznak. Jelöljük ezen halmazt $H_{AB}=H(A,B)$ -vel. Jelölje a H_{AB} halmazhoz tartozó útszakaszok összhosszát (vagy összterületét) L_{AB} , az (a,b) szakaszhoz tartozó útszakasz hosszát (vagy területét) pedig l_{ab} .

L_{AB} definícióját tehát a következőképpen adjuk meg:

$$L_{AB} = \sum_{(a,b) \in H_{AB}} l_{ab} \quad (3,8)$$

A modellnek ebben az esetben arra kell választ adnia, hogy az L hány százalékát kell a h_1 , hány százalékát a h_2 , ..., hány százalékát a h_p beavatkozással kezelni. Ezzel az egészértékűség helyébe a linearitás kerül, mivel a döntés nem a teljes H_{AB} halmazról, hanem annak csak bizonyos részhalmazáról történik.

A lineáris programozási modell olyan megoldást szolgáltat, amely:

- minimalizálja a teljes beavatkozás költségét egy vagy több időperiódusra;
- a megoldás eleget tesz az úthálózat százalékos megoszlására előírt feltételeknek;
- megadja minden egyes H_{AB} útszakasz-csoportra a beavatkozás-típusok százalékos megoszlását;
- megadja a teljes hálózatra beavatkozás-típusonként az összes beavatkozást;
- a beavatkozási költségek ismeretében lehetővé teszi a költségek területenkénti elosztását.

A lineáris programozási modelleknél az egyik alapprobléma a leromlási folyamatok leírása. A leromlási modell elkészítéséhez idősor szükséges. Ez rendszerint nem áll rendelkezésre. Az egyik megoldás az, hogy a leromlást leromlási paraméterenként exponenciális függvénnyel adjuk meg vagy pedig több paraméter esetén többváltozós függvénnyel.

A másik lehetőség olyan mátrix megadása, amelynél minden forgalmi kategória, útburkolat-típus – az előző évi beavatkozás és az aktuális állapot ismeretében – megad valamilyen állapotmegoszlást. Ez a Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrix. Itt felhasználjuk a Markov-láncok tulajdonságát, miszerint az állapot csak a pillanatnyi állapottól és az eltelt

időtől függ. Így akár egy periódusra egyszerű leromlási modellt alkalmazhatunk, amely az egész időszakra is meghatározza az állapotleromlás megoszlását.

Az alábbiakban –a hazai közúthálózat útgazdálkodási matematikai modelljén keresztül – ennek az alkalmazását mutatjuk be.

3.3.3. Hálózati szintű PMS

A modell a 90-es évek második felében készült, a mérnöki vonatkozásokkal Gáspár [46] foglalkozott, a matematikai modellt Bakó [26] készítette, a programozási munkákat pedig Szántai [79] végezte.

A modellben felhasználjuk a Markov-lánc fogalmát és tulajdonságait [73]. Tegyük fel, hogy egy úthálózat lehetséges állapotai diszkrét halmazt alkotnak. Jelöljük ezeket az állapotokat az $1, 2, \dots, n$ számokkal. A rendszer időben véletlenszerű állapotváltozásokat végez és a pillanatnyi állapotszintjét a $T = 1, 2, \dots$ időpontokban megfigyeljük.

Definiáljuk az x_0, x_1, \dots valószínűségi változókat a következő módon: $x_n = i$, ha a rendszer a $t = n$ időpontban az i állapotban van. A rendszer állapotváltozásait így az x_0, x_1, \dots valószínűségi változók írják le. A kiinduló állapot lehet rögzített is.

Egy x_0, x_1, \dots valószínűségi változók sorozatát Markov-láncnak nevezzük, ha bármely egészértékű $t_0 < t_1 < \dots < t_{n+1}$ időpont és k_1, k_2, \dots, k_{n+1} állapot között fennáll a következő összefüggés:

$$P(x_{t_{n+1}} = k_{n+1} | x_{t_1} = k_1, \dots, x_{t_n} = k_n) = P(x_{t_{n+1}} = k_{n+1} | x_{t_n} = k_n) \quad (3.9)$$

A fenti definíció szerint annak a valószínűsége, hogy a rendszer a t_{n+1} -edik időpontban a k_{n+1} állapotban lesz, csak az előző állapottól függ és független attól, milyen állapotokon ment keresztül. Az alábbi valószínűségeket r lépéses átmeneti valószínűségnek nevezzük:

$$q_{ik}^{(r)} = P(x_{n+r} = k | x_n = i) \quad (3.10)$$

A (3.10)-ben megadott valószínűségeket mátrixba foglaljuk össze és ezt átmeneti valószínűség mátrixnak nevezzük.

$$\mathbf{Q}_r = \begin{bmatrix} q_{11}^{(r)} & q_{12}^{(r)} & \dots \\ q_{21}^{(r)} & q_{22}^{(r)} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

A \mathbf{Q}_r mátrix négyzetes, elemei nem negatívak és sorainak összege 1, ezért \mathbf{Q}_r sztochasztikus mátrix. Meg lehet mutatni, hogy ilyen mátrixok szorzata is megtartja ezt a tulajdonságot. A modellben egy lépéses átmeneti valószínűségi mátrixot használunk, így az indexelés elhagyható. Bebizonyítható az a tétel, aminek eredményét a továbbiakban felhasználjuk: az r lépéses átmeneti valószínűségek mátrixa egyenlő az egy lépéses átmeneti valószínűségi mátrix r -edik hatványával, azaz:

$$\mathbf{Q}_r = \mathbf{Q}^r \quad (3.12)$$

A fentieket figyelembe véve megalkothatjuk a modellben alkalmazott mátrixot. Itt az egyes állapotok megfelelnek egy adott típusú és minőségű útnak. A mátrix sorainak és oszlopainak száma egyenlő az összes lehetséges útállapottal. A \mathbf{Q} mátrix q_{ij} eleme annak a valószínűsége, hogy az i állapotban levő út a tervezett időperiódus végére átkerül a j állapotba.

Ha ismert egy kiindulási $X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0T})$ eloszlás, akkor egy időperiódus végére az új X_1 eloszlást a \mathbf{Q} mátrix segítségével kapjuk meg:

$$X_1 = \mathbf{Q}X_0 \quad (3.13)$$

A mátrix említett tulajdonságait figyelembe véve a $t=1,2,\dots,T$ időperiódusokra előállíthatjuk a hozzájuk tartozó X_1, X_2, \dots, X_T állapotokat a következő rekurzióval:

$$\begin{aligned} X_1 &= \mathbf{Q}X_0 \\ X_2 &= \mathbf{Q}X_1 = \mathbf{Q}\mathbf{Q}X_0 = \mathbf{Q}^2X_0 \\ X_3 &= \mathbf{Q}X_2 = \mathbf{Q}^3X_0 \\ &\vdots \\ X_T &= \mathbf{Q}X_{T-1} = \mathbf{Q}^T X_0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Az ilyen típusú modelleknél általában felteszik, hogy a tekintett időperiódus alatt az út vagy a megadott állapotban marad, vagy pedig egy kategóriával rosszabb állapotba kerül. Ez esetünkben nincs feltéve, mivel statisztikai elemzésnél pozitív valószínűséggel adódott, hogy az adott állapotú út kettőnél több különböző állapotba is kerülhet.

Az átmeneti valószínűség mátrix elemeinek meghatározása a modell egyik legfontosabb eleme. Ha a mátrix nem megbízható, akkor a modell hibás eredményt szolgáltat, mert a leromlási folyamat leírása nem megfelelő. Az elemek meghatározása többféleképpen is lehetséges:

- mérnöki szakértői becsléssel,
- az állapotok és az életkorok gyakoriságának ismeretében nemlineáris programozással,
- a Markov-mátrixok jellegének kihasználásával legkisebb négyzetek módszerével.

Valójában az átmeneti valószínűség mátrix függ az útburkolat típusától, a rajta levő forgalom nagyságától és a beavatkozás típusától. Így s úttípus, f forgalmi kategória és p beavatkozás típus esetén összesen $s \cdot f \cdot p$ különböző Q mátrixszal kell dolgoznunk. Ezért a modellben szereplő paraméterek számának megválasztásánál ügyelni kell a feladat megoldhatóságára (gépkapacitás, futási idő).

Az első magyar hálózati modell 2 útburkolattípussal, az aszfaltbeton és az aszfaltmakadám foglalkozott, ezek ugyanis lefedik az országos közúthálózat döntő (kb. 90%-os) részét.

A forgalomnagyságot 3 kategóriába sorolták:

1. $0 \leq \text{ÁNF} \leq 3000$
2. $3001 \leq \text{ÁNF} \leq 8000$
3. $8000 > \text{ÁNF}$.

A beavatkozások száma is befolyásolja a modell méretét. Valójában minden fontosabb beavatkozás-típussal kellene foglalkozni, de az első változatban a beavatkozások számát igyekeztek korlátozni, ugyanis minden beavatkozás-típushoz az LP modellben 246 oszlop tartozik. Így a modell összesen 3 beavatkozás-típust alkalmaz:

- rutinszerű fenntartás (beleértve a „do nothing” esetét),
- felületi bevonás,
- új aszfaltrétegek építése.

A különböző PMS-modellek más és más számú beavatkozásszámmal dolgoznak. Az egyik legrégebbi, az Arizona-modell kezdetben 17 beavatkozást tartalmazott, majd tíz éves üzemeltetés után arra az elhatározásra jutottak, hogy a beavatkozások száma hatra

csökkenthető [81]. A projekt szintű modelleknél a beavatkozások száma a feladat jellegéből adódóan ennél több.

Így az összes mátrixok száma a 2 útburkolattípus, a 3 forgalmi kategória, a 3 beavatkozás-típus következtében 18, ebből kettő gyakorlati szempontból elhagyható, mert nagy forgalom esetén a felületi bevonás alkalmazása nem hatékony, bár a modellben szerepel.

A másik meghatározó a mátrix mérete, azaz sorainak száma. Ez az útállapot-kategóriák számától függ. Az adatmodell nem az összesített állapotindexet (PCI) használja, hanem az út-adatbankból hozzáférhető 3 meglévő útállapot-osztályzatot (teherbírást, felületi egyenetlenséget és felületépséget). Mindhárom osztályzat 1 és 5 közötti értékeket vehet fel, így a lehetséges állapotok száma 125. Mérnöki megfontolások alapján megállapítható volt, hogy összesen csak 41 lehetőséget kell figyelembe venni, a többi elhanyagolható arányban fordul elő, illetve beolvasható a többi állapotképek közé. Így a \mathbf{Q} mátrix mérete $41 \cdot 41$. Az osztályzatoknál a minőségi sorrend a következő: 1 jelenti a legjobb, ..., 5 a legrosszabb állapotot. Az ilyen összevonás ugyan mindig veszélyeket rejt magában, de a külföldi példákat figyelembe véve azt mondhatjuk, hogy megtehető. A PCI indexszel dolgozó modellek tíz diszkrét állapotképpel dolgoznak, más modellek 24-gyel [81]. A Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrix állapotképeit a 2. táblázat mutatja.

Sorszám	Állapotkép
1.	111
2.	112
3.	113,114,115
4.	131,132,151
5.	133,152
6.	134,135
7.	153,154,155
8.	211
9.	212
10.	213
11.	231,251
12.	232,252
13.	233,214
14.	234,215,235,254,255
05.	311
16.	312,331
17.	313,314
18.	332,351
19.	333,352,353
20.	315,334,335
21.	354,355
22.	411
23.	412
24.	423,414
25.	431,432
26.	433
27.	415,434,435
28.	451,452
29.	453
30.	454
31.	455
32.	511
33.	512
34.	513
35.	514,515
36.	531,532,551
37.	533,552
38.	534,535
39.	553
40.	554
41.	555

2. táblázat Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrix állapotképei [46]

A továbbiakban az indexekre a következő jelölést alkalmazzuk:

s	úttípus (1: aszfaltbeton, 2: aszfaltmakadám),
f	forgalmi kategória (1: alacsony, 2: közepes, 3: nagy),
p	beavatkozás típusa (1: rutinszerű fenntartás, 2: felületi bevonás, 3: új aszfaltréteg).

A fenti jelölésekkel \mathbf{Q}_{sfp} jelenti az s úttípus, f forgalmi kategória és a p beavatkozás típushoz tartozó átmeneti valószínűség mátrixot.

Jelölje \mathbf{X}_{sfp} az s úttípushoz, az f forgalmi kategóriához és a p beavatkozás-típushoz tartozó vektort, amelynek i -edik eleme X_{sfp_i} az s , f , p indexekhez tartozó utak i -edik állapotba eső részére mondja meg, hogy az utak hány százalékán kell a p beavatkozást végrehajtani, a vektor elemei területi arányt jelentenek. A továbbiakban egyszerűség kedvéért az i indexet nem tüntetjük fel, így az \mathbf{X}_{sfp} vektorral dolgozunk.

Az első feltétel az ún. Markov-stabilitást biztosítja:

$$\sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^3 (\mathbf{Q}_{sfp} - \mathbf{U}) \mathbf{X}_{sfp} = \mathbf{0}, \quad (3.15)$$

ahol \mathbf{U} egy $41 \cdot 41$ méretű egységmátrix. A feltétel azt fejezi ki, hogy a kapott eloszlás a tervezési periódus végére megegyezik a tervezési periódus elején levő megoszlással. Az egyenlőség nem mindig teljesíthető, ezért itt a $<$, \leq , $>$, \geq feltételek valamelyikét is használhatjuk az egyenlőség helyett; adott modellvariáció futtatása esetén a modell felhasználója dönthet a kérdésben.

A magyar modell több, az útállapot-összetétellel, szakmapolitikai célkitűzésekkel összefüggő egyéb feltételt is használ. A modell felhasználja azt, hogy úttípusonként az összforgalom a tervezési periódus alatt feltehetően nem változik.

A fentiek mellett vezessük be a további jelölést: \mathbf{b}_{sf} jelölje az s úttípushoz, f forgalmi kategóriához tartozó utak mennyiségi arányát. Ez az alábbi feltételi egyenleteket jelenti:

$$\begin{array}{rcccccc}
\mathbf{X}_{111} & & + \mathbf{X}_{112} & & + \mathbf{X}_{113} & = & \mathbf{b}_{11} \\
& \mathbf{X}_{121} & & + \mathbf{X}_{122} & & + \mathbf{X}_{123} & = & \mathbf{b}_{12} \\
& & \mathbf{X}_{131} & & + \mathbf{X}_{132} & & + \mathbf{X}_{133} & = & \mathbf{b}_{13} \\
\mathbf{X}_{211} & & + \mathbf{X}_{212} & & + \mathbf{X}_{213} & = & \mathbf{b}_{21} \\
& \mathbf{X}_{221} & & + \mathbf{X}_{222} & & + \mathbf{X}_{223} & = & \mathbf{b}_{22} \\
& & \mathbf{X}_{231} & & + \mathbf{X}_{232} & & + \mathbf{X}_{233} & = & \mathbf{b}_{23}
\end{array}$$

A korlátozó feltétel első sora például azt jelenti, hogy a kisforgalmú aszfaltbeton utak összterülete (\mathbf{b}_{11}) ne változzon. Ez a mennyiség a beavatkozás típusától független, ezért összegyűjtjük a harmadik indexre. Egyszerűbb formában felírva az összefüggést:

$$\sum_{p=1}^3 \mathbf{X}_{sfp} = \mathbf{b}_{sf}, \quad f = 1, 2, 3 \quad s = 1, 2. \quad (3.16)$$

Az úttípusok összterülete nem változik, azaz

$$\sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^3 \mathbf{X}_{sfp} = \mathbf{d}_s, \quad s = 1, 2, \quad (3.17)$$

ahol \mathbf{d}_s az s . úttípus aránya a többi típushoz képest. ($\mathbf{d}_1 + \mathbf{d}_2 = \mathbf{1}$, ahol $\mathbf{1}$ olyan vektor, amelynek minden eleme 1).

Mivel a modell a hálózat minden elemét tartalmazza, ezért feltételezzük, hogy minden szakasszal foglalkozunk, azon valamilyen beavatkozást végzünk. Ez lehet a rutinszerű fenntartás is, amely adott esetben a beavatkozás-mentességet („do nothing”) is magában foglalja. Ezzel kapcsolatos a következő feltétel is: az összes útszakaszon kell valamilyen beavatkozást végezni, azaz

$$\sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^3 \mathbf{X}_{sfp} = \mathbf{1}. \quad (3.18)$$

További feltételekben előírhatjuk az útállapot megoszlását. Az úthálózat üzemeltetői, a hálózattal foglalkozó szakpolitikusok koncepciót alakíthatnak ki a különböző állapotú utak megoszlásával kapcsolatban. Itt rendszerint olyan előírásokat teszünk, hogy a tervezési periódus végére legfeljebb mennyi lehet a rossz állapotban levő utak mennyisége. Hasonlóképpen előírhatjuk azt is, hogy a jó állapotú utak hosszának (területének) minimum mennyinek kell lennie. További előírás lehet a közepes utakra is akár alsó, akár pedig felső korlát megadása. A modell egyik legerősebb előírása éppen ez, ugyanis nem mindig található

olyan megoldás, amely az útállapot-eloszlásra előírt feltételeket rögzített költségkorlát esetén kielégíti.

Jelölje a „jó” állapotminősítésű utak halmazát J , a „rossz” utakét R , az egyéb utakét pedig E . A fenti halmazokra fennállnak a következő összefüggések:

$$\begin{aligned} J \cap R &= \emptyset, & J \cap E &= \emptyset, \\ R \cap E &= \emptyset, \\ J \cup R \cup E &= H, \end{aligned} \tag{3.19}$$

ahol H az összes utak halmaza.

Az úthálózat minőségi összetételével kapcsolatos feltételeket a következőképp írhatjuk le matematikailag:

$$\begin{aligned} \sum_{sfp \in J} \mathbf{X}_{sfp} &\geq \mathbf{b}_J, \\ \sum_{sfp \in R} \mathbf{X}_{sfp} &\leq \mathbf{b}_R, \\ \underline{\mathbf{b}}_E &\leq \sum_{sfp \in E} \mathbf{X}_{sfp} \leq \bar{\mathbf{b}}_E, \end{aligned} \tag{3.20}$$

ahol

- \mathbf{b}_J a „jó” állapotminősítő paraméterrel rendelkező utak százalékos aránya,
- \mathbf{b}_R a „rossz” állapotminősítő paraméterrel rendelkező utak százalékos aránya,
- \mathbf{b}_E az egyéb útszakaszok százalékos megoszlására vonatkozó alsó határ,
- $\bar{\mathbf{b}}_E$ az egyéb útszakaszok százalékos megoszlására vonatkozó felső határ.

Költségek és célfüggvény

Költségként ismert a \mathbf{C}_{sfp} vektorok halmaza, ahol ez az s úttípushoz, f forgalomnagysághoz és a p beavatkozási típushoz tartozó költség. Ennek összesen 41 eleme van, mivel a beavatkozás költsége függ(het) az út aktuális állapotától is. Az \mathbf{X}_{sfp} vektor definíciójánál elmondottakhoz hasonlóan az útállapotot jelölő indexet elhagyjuk, és \mathbf{C}_{sfp} -vel, mint vektorral dolgozunk.

A (3.15)-(3.20) feltételeknek eleget tevő \mathbf{X} megoldások a lineáris programozási feladat lehetséges megoldásai. Az egyik lehetséges célfüggvény esetén ezen \mathbf{X} megoldások közül azt a megoldásvektort (vagy vektorokat) kell meghatározni, amelyhez tartozó összberuházási költség minimális, azaz

$$C = \sum_s \sum_f \sum_p \mathbf{X}_{sfp} \mathbf{C}_{sfp} \rightarrow MIN ! \quad (3.21)$$

A feladatot ezzel a célfüggvénnyel megoldva megkapjuk azt a C értéket, amennyi összeg a (3.15)-(3.20) feltételekben előírt feladatok megvalósításához szükséges.

Rendszerint ez az összeg nem áll rendelkezésre, hanem csak valamely $C^* < C$ összeg. Ekkor a költségkorlát is bekerül a feltételek közé, azaz

$$\sum_s \sum_f \sum_p \mathbf{X}_{sfp} \mathbf{C}_{sfp} \leq C^*. \quad (3.22)$$

A cél ez esetben lehet olyan megoldás keresése, ahol az úthasználók összhaszna (utazási idő, közlekedési költség, baleseti költség, stb.) maximális.

Jelölje az s úttípushoz, f forgalmi kategóriához és a p beavatkozáshoz tartozó haszon értékét \mathbf{h}_{sfp} (ez szintén függhet a pillanatnyi állapottól, ezért vektor). A célfüggvény ebben az esetben tehát az egyének utazásaihoz tartozó összhaszon maximalizálása:

$$\sum_s \sum_f \sum_p \mathbf{X}_{sfp} \mathbf{h}_{sfp} \rightarrow MAX ! \quad (3.23)$$

A költség, illetve haszon szempontjából két típust különböztethetünk meg a kitézített cél illetve nézőpont szerint:

- a) társadalmi költség, illetve haszon (ún. társadalmi optimum),
- b) egyéni közlekedők összhaszna (ún. egyéni optimum).

A különböző közgazdasági, közlekedési modellek esetén a két célkitűzéshez tartozó optimális megoldás rendszerint nem esik egybe. Itt feltételezzük, hogy mind a társadalmi optimumhoz tartozó célfüggvény (3.21), mind pedig az egyénihez tartozó célfüggvény lineáris (3.23).

A két modell abban tér el egymástól, hogy a

- társadalmi optimumhoz tartozó célfüggvény az egyéni optimum esetén bekerül a korlátozó feltételek közé (3.22),
- az egyéni optimum esetén a célfüggvény az úthasználók hasznának maximalizálása.

Ez a maximalizálási célfüggvény egyszerűen átalakítható minimalizálási feladattá, ahol a közlekedők (úthasználók) összköltségét minimalizáljuk. A közlekedők haszna ugyanis akkor

maximális, ha a közlekedésre fordított összköltsége minimális. A közlekedési költség az út minőségével változik: rendszerint a romlásával nő, javulásával pedig csökken.

Ezen költségek a következők:

- jármű amortizációs költség,
- üzemanyag-fogyasztásból eredő többletköltség,
- gumiabroncskopásból eredő költség,
- kenőanyag-többletfogyasztási költség,
- utazási idővel kapcsolatos költség,
- fajlagos baleseti költségek.

Jelölje a fenti költségeket $\mathbf{K}_{\text{sfp}1}$ (amortizáció), $\mathbf{K}_{\text{sfp}2}$ (üzemanyag-fogyasztás), $\mathbf{K}_{\text{sfp}3}$ (gumiabroncskopás), $\mathbf{K}_{\text{sfp}4}$ (kenőanyag), $\mathbf{K}_{\text{sfp}5}$ (idő), $\mathbf{K}_{\text{sfp}6}$ (baleset). A fenti jelöléseket használva, az egyéni optimumhoz tartozó célfüggvény:

$$\sum_s \sum_f \sum_p \mathbf{X}_{\text{sfp}} \left(\sum_{l=1}^6 \mathbf{K}_{\text{sfp}l} \right) \rightarrow \text{MIN} ! \quad (3.24)$$

Az egyéni és a társadalmi célok a legtöbb esetben nem esnek egybe. A társadalom ugyanis törekszik a legjobbnak ítélt beavatkozás-sorozat meghatározására, de erre rendszerint nincs elegendő forrása. Így a modellbe belekerül a költségkorlát. A lineáris programozás elmélete szerint a lehetséges megoldások halmaza olyan konvex poliéder, amelynek oldalait az egyes feltételek határozzák meg. Az egyéni és a társadalmi optimumhoz tartozó poliéderek csak akkor esnek egybe, ha a (3.22) feltétel redundáns, azaz nem befolyásolja a konvex poliédert. Ez pedig akkor fordul elő, ha a költségmegtötés nem befolyásolja a megoldást.

A társadalmi összköltség minimalizálása és az egyéni haszon maximalizálása (illetve az egyéni közlekedési költségek minimalizálása) között megkísérelhetünk egyensúlyt teremteni a mindkét célt kielégítő megoldás megkeresésével. Ehhez kombinált célfüggvény alkalmazására van szükség, amelyet az alábbi módon képezhetünk.

A beruházási költség minimalizálását, illetve az úthasználók hasznának maximalizálását együttesen figyelembe vevő célfüggvény:

$$\sum_s \sum_f \sum_p \mathbf{X}_{\text{sfp}} (\mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{h}_{\text{sfp}}) \rightarrow \text{MIN} ! \quad (3.25)$$

Amennyiben az egyéni közlekedési költséget kívánjuk minimalizálni minimális beavatkozási összköltség mellett, akkor a következő célfüggvényt kell alkalmaznunk:

$$\sum_s \sum_f \sum_p \mathbf{X}_{sfp} (\mathbf{C}_{sfp} + \sum_{l=1}^6 \mathbf{K}_{sfp_l}) \rightarrow MIN ! \quad (3.26)$$

3.3.4. Útburkolat-gazdálkodási modell kidolgozása

Hosszú távú hálózati modell kidolgozása az előző fejezetben leírtak továbbfejlesztéseként valósult meg [28]. A hosszú távú úthálózati modell esetén keressük azt a műszaki-gazdasági ráfordításokat optimálisan felhasználó megoldást, amely meghatározza, hogy az optimális útfenntartási, illetve -felújítási munkák elvégzése esetén az úthálózat fenntartása mibe kerül. Azaz keressük azt az egyensúlyi állapotot, amelynél beáll a legkedvezőbb stabil állapot. Ezt a megoldást hívjuk Markov-lánc felhasználásával stabil megoldásnak. A célfüggvény minimumát, más szóval az útfenntartási és a közlekedésüzemi költségek minimumát kell megtalálni, mert az optimum itt a társadalmi összköltségek minimalizálását jelenti. A modellt megfogalmazhatjuk a teljes időszakra, illetve a vizsgált időszakot több periódusra bontva is.

A modell fő jellemzői a következők:

- több (maximálisan 10) időperiódus;
- két útburkolattípus (aszfaltbeton és aszfaltmakadám), jele s ,
- 3 forgalmi kategória, jele f ,
- 4 állapotjellemző (felületi egyenetlenség, teherbírás, felületépség, nyomvályú mélység),
- kombinált célfüggvény,
- legfeljebb 8 állapotjavító beavatkozás, jele p .

Az előző fejezet jelöléseit felhasználva, a teljes időszakra vonatkozó modell a következő:

Keressük azt a vektorsorozatot, amely kielégíti a Markov-stabilitási feltételt:

$$\sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^8 (\mathbf{Q}_{sfp} - \mathbf{U}) \mathbf{X}_{sfp} = \mathbf{0} \quad (3.27)$$

Cél a teljes beavatkozási és összköltség minimalizálása:

$$C = \alpha \sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^8 \mathbf{X}_{sfp} \mathbf{C}_{sfp} + \beta \sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^8 \mathbf{X}_{sfp} \mathbf{K}_{sf} \rightarrow MIN, \quad (3.28)$$

ahol α a beavatkozási összköltséget, β pedig a közlekedési összköltséget súlyozó faktor.

A \mathbf{Q} és az \mathbf{U} mátrix méretét a lehetséges állapotképek száma alapján adhatjuk meg – 3, 3, 3, illetve 5 minősítő paraméter szokásos, így a mátrix mérete 135·135. A mátrixok száma pedig az útburkolattípusok, forgalmi kategóriák és beavatkozásfajták számának szorzataként 48-nak adódik.

A többperiódusú modell esetén a cél az, hogy a stabil modell eredményét több éven át tartó közelítéssel érjük el. A periódusok száma rendszerint 10, s a modell évenként megadja az egyes periódusokban az útfenntartási beavatkozást. A modell matematikai megfogalmazásánál az előző pontban használt jelöléseket alkalmazva, bejön új paraméterként a periódusra vonatkozó t index, amely évekre vonatkozik.

A tervperiódusok futóindexe t , amelynek lehetséges értékei 1, ..., 10.

Az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához, a p beavatkozáshoz tartozó ismeretlen vektort a t -edik évben jelölje \mathbf{X}_{sftp} . Ennek elemei a különböző állapotképekhez tartozó területi hányadokat jelentik a t -edik évben.

Az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához és a p beavatkozáshoz tartozó beavatkozási egységköltség vektort jelölje \mathbf{C}_{sfp} .

Az s útburkolattípushoz és f forgalmi kategóriához tartozó úthasználói költségvektort jelölje \mathbf{K}_{sf} .

Jelölje \mathbf{Y}_{sft} az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához tartozó útszakaszok területi hányadát a t -edik évben elvégzett beavatkozások után.

Jelölje \mathbf{b}_{sf} az s úttípushoz és az f forgalmi kategóriához tartozó területi hányadot a tervezési periódus kezdetén.

Feltételek:

Az első kötelezően előírt feltétel a kezdeti állapoteloszlással kapcsolatos. Olyan kiindulási \mathbf{X} vektort kell választanunk az első évben, amelynek területi hányadai megegyeznek a kezdeti év területi hányadaival:

$$\sum_{p=1}^8 \mathbf{U} \mathbf{X}_{\text{sf}p1} = \mathbf{b}_{\text{sf}}, \quad s = 1,2 \quad f = 1,2,3, \quad (3.29)$$

ahol \mathbf{U} a $135 \cdot 135$ -ös egységmátrix.

A második feltétel az első tervezési év végére adja meg a területi hányadokat. Ezzel az első tervezési év végén levő $\mathbf{Y}_{\text{sf}1}$ területi hányad vektort határozzuk meg:

$$\sum_{p=1}^8 \mathbf{Q}_{\text{sf}p} \mathbf{X}_{\text{sf}p1} = \mathbf{Y}_{\text{sf}1}, \quad s = 1,2 \quad f = 1,2,3. \quad (3.30)$$

A következő feltétel a közbülső évekre vonatkozik. Ez a feltétel azt jelenti, hogy $\mathbf{Y}_{\text{sf}t}$, azaz a t -edik. periódus végén kapott területi hányad a $(t+1)$ -edik periódusra a kezdeti eloszlást szolgáltatja:

$$\sum_{p=1}^8 \mathbf{U} \mathbf{X}_{\text{sf}p(t+1)} - \mathbf{Y}_{\text{sf}t} = \mathbf{0}, \quad s = 1,2 \quad f = 1,2,3 \quad t = 1,2,\dots,9. \quad (3.31)$$

Az év végi területi hányadokat a Markov-féle mátrix felhasználásával kapjuk:

$$\sum_{p=1}^P \mathbf{Q}_{\text{sf}p} \mathbf{X}_{\text{sf}p(t+1)} = \mathbf{Y}_{\text{sf}(t+1)}, \quad s = 1,2, \quad f = 1,2,3, \quad t = 1,2,\dots,9 \quad (3.32)$$

A feladat egyik legfontosabb kötelezően előírható korlátja a költségkorlát. A beavatkozási költségeket előírhatjuk az egész tervezési periódusra vagy évenként. Az évenkénti beavatkozási költségkorlát a következő:

$$\sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^8 r^{(t-1)} \mathbf{C}_{\text{sf}p} \mathbf{X}_{\text{sf}pt} = r^{(t-1)} \mathbf{M}, \quad t = 1,2,\dots,10, \quad (3.33)$$

ahol r a diszkontálási együttható, \mathbf{M} pedig az évenkénti beavatkozásra rendelkezésre álló pénzösszeg.

Előírhatunk tervezési időszak végére megkívánt állapoteloszlást is.

Célfüggvény:

Az egyes PMS modellekben különböző célfüggvényeket szokás használni. Ezek egy része a beavatkozási költségekkel, más része a forgalomban részt vevők úthasználói költségeivel kapcsolatos. A vizsgált esetben a kettő kombinációját, súlyozott összegét alkalmaztuk. A konstansok megfelelő megválasztásával mindkét költségfüggvény külön-külön is előállítható.

A kombinált célfüggvény a következő:

$$C = \alpha \sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{p=1}^8 \sum_{t=1}^{10} \mathbf{X}_{\text{sftp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} + \beta \sum_{s=1}^2 \sum_{f=1}^3 \sum_{t=1}^9 \mathbf{Y}_{\text{sft}} \mathbf{K}_{\text{sf}} \rightarrow \text{MIN} . \quad (3.34)$$

A fenti célfüggvényből $\alpha = 0$ esetén csak az úthasználói költségeket vesszük figyelembe, $\beta = 0$ esetén pedig csak a beavatkozási költségeket. A konstansok variálásával a két költségtípust tetszés szerint súlyozhatjuk.

Néhány újabb, a témában megjelent cikk:

A PMS megoldásánál a leromlási modellt nem homogén diszkrét Markov-láncokkal fogalmazza meg és ennek alapján nem lineáris optimalizációs modellt épít fel Abaza [2, 3].

A közlekedési infrastruktúra fenntartási és javítási beruházásait a bruttó költség minimalizálásával oldja meg, a modellben a Kálmán-szűrő algoritmust is alkalmazza Durango-Cohen [40].

A PMS probléma megoldására egy evolúciós eljárást dolgozott ki Nunoo és Mrawira [71]. Hasonló modellt dolgozott ki rugalmas burkolatok esetére Abaza [1].

Heurisztikus költség-haszon elemzésen alapuló PMS modellt közöl cikkében Brilllet és Lepert [34].

Leromlási folyamatok Markov-láncokkal történő elemzéséről ír Weininger-Vycudil [84].

Mérnöki szerkezetek menedzsment rendszerével foglalkozik, és alkalmazza eredményeit a francia gyorsforgalmi utak rendszerére Simon [78].

A PMS modellek különböző szinteken történő alkalmazásával Heller foglalkozik [57], a stratégiai és operatív – más néven a hálózati és a projekt – szint kapcsolatát tárgyalja.

Néhány szerző, mint például Bham [33] és Hans [56] egy GIS alapú rendszert épített fel Illionis államra.

3.3.5. A Markov-féle modell hazai pontosítása

A 90-es évek első felében kialakított hazai PMS-modell [26, 46] – burkolatleromlási görbék hiányában – Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrixot hasznosított. Ezek pontosítására, a tényleges hazai útpályaszerkezetek figyelembevételére a KTI 1991-ben 60 db – a pályaszerkezet-típus, a forgalom és a földmútípus szerint jellegzetes – útszakasz rendszeres,

évenkénti állapotfelmérését kezdte el. Már 19 éve folyik ez a rendszeres megfigyelés, amely 14 útszakasz-osztályban egyre pontosabb hálózatviselkedési modellek kialakítását tette lehetővé [49], felületi egyenetlenség, keréknyomvályú-mélység, teherbírás, felületi hibák, makroérdeesség és mikroérdeesség szempontjából. Ezekkel a hálózatviselkedési információkkal a Markov-mátrixok egyes elemei lépésenként pontosíthatók [50]. További fontos információ a már majdnem két évtizede tartó burkolat-megfigyelésből, hogy az időközben felújításra került etalon-szakaszok további állapotvizsgálata révén tényleges információkhoz jutottak a valóságos beavatkozási határ (állapotszint), a felújítás hatására elért tényleges állapot javulás és – nem utolsó sorban – az újabb ciklusidő jellemzőiről, összehasonlítva a megelőzővel (hasonló sebességgel, gyorsabban vagy lassabban romlik-e le). Mindezek jelentős hozzájárulásnak tekinthetők a magyar közúti vagyongazdálkodás megteremtésére tett koncentrált erőfeszítésekhez [51]. Mindezekkel a hazai útügyi kutatás igazodik a vagyongazdálkodással [52] és a teljesítményi mérőszámokkal (Performance Indicators) [53] összefüggő európai tendenciákhoz.

3.3.6. Sztochasztikus modell kialakításának a lehetősége

Az útburkolat-gazdálkodásnál a rendelkezésre álló adatok pontatlansága és az esetleges állapotfelvételi hibák miatt célszerűnek látszik sztochasztikus modell alkalmazása. Itt akár a költségek, akár a technológiai mátrix elemei is lehetnek valószínűségi változók. Egy érdekes sztochasztikus programozási modellt javasol Prékopa András, melyet – még nem publikált változatban – személyesen ismerttettem.

Javasolt modelljében az útszakaszokat homogén csoportokra osztjuk, pl. burkolattípus szerint – jelölje a csoportok indexét $i, i=1, \dots, I$. Az i -edik csoportbeli útszakaszok számát jelölje n_i , az egyes útszakaszok indexe pedig legyen $j, j=1, \dots, n_i$. Minden i -edik csoportba eső útszakasz N_i különböző állapotban lehet, az útállapotok javuló sorrend szerinti indexelésére használjuk a k betűt, $k=1, \dots, N_i$.

Jelölje T_{ij} az i -edik csoport j -edik útszakaszának az útburkolat felületét. A t -edik év tavaszán az úthálózat minden szakaszát megvizsgálják és meghatározzák az állapotát. Ennek leírására használjuk az $X_{ijk}^{(t)}$ 0-1 értékű változókat, azaz legyen

$$X_{ijk}^{(t)} = \begin{cases} 1, & \text{ha az } i\text{-edik csoport } j\text{-edik útszakasza a } t\text{-edik évben a } k \text{ állapotban van,} \\ 0, & \text{máskülönben.} \end{cases}$$

Így az i -edik csoport k -állapotban lévő útszakaszainak az összterülete úgy írható le, mint

$$\sum_{j=1}^{n_i} X_{ijk}^{(t)} T_{ij}.$$

Vezessük be az $x_{ijhk}^{(t)}$ döntési változókat, melyek az i -edik csoport t időpontban a k állapotban lévő j -edik útszakaszán végrehajtandó beavatkozás milyenségét döntenek el a következő értelemben:

$$x_{ijhk}^{(t)} = \begin{cases} 1, & \text{ha a } k \text{ állapotban lévő útszakaszra olyan beavatkozást hajtunk végre,} \\ & \text{hogy az a } h \text{ állapotba jut,} \\ 0, & \text{máskülönben.} \end{cases}$$

A fenti döntési változókat nyilván elég csak a $h=k, k+1, \dots, N_i$ indexekre bevezetni, hiszen bármiféle beavatkozás csak javíthat az útszakasz éppen meglévő állapotán.

Jelöljük a $h=k, k+1, \dots, N_i$ döntési változóknak megfelelő beavatkozási költségeket $c_{ijhk}^{(t)}$ -val. Az útszakaszoknak a beavatkozásokat követő egy év alatti véletlen leromlását az alábbi valószínűségi változókkal modellezhetjük:

$$Y_{ijh}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & \text{ha a } h \text{ állapotszintre vitt } j \text{-edik útszakasz a következő évi leromlás} \\ & \text{után legalább olyan jó, mint volt,} \\ 0, & \text{máskülönben.} \end{cases}$$

Ha ekkor azt akarjuk előírni, hogy a javítás és a következő téli leromlás után (de még az újabb javítás előtt) nagy valószínűséggel ne csökkenjen a k szintű útszakaszok összterülete, akkor nyilván az alábbi valószínűségi korlátozásokat kell előírni:

$$P\left(\sum_{j=1}^{n_i} X_{ijk}^{(t)} T_{ij} \leq \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{h \geq k} Y_{ijh}^{(t+1)} T_{ij} x_{ijhk}^{(t)}\right) \geq p_k, \quad (3.35)$$

ahol p_k minden k -ra 1-hez elég közeli valószínűség érték.

Ha mindezt minimális beavatkozási költséggel kívánjuk elérni, akkor az alábbi sztochasztikus programozási feladatot kell megoldanunk:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{h \geq k} c_{ijhk}^{(t)} x_{ijhk}^{(t)} \quad (3.36)$$

feltéve, hogy

$$P\left(\sum_{j=1}^{n_i} X_{ijk}^{(t)} T_{ij} \leq \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{h \geq k} Y_{ijh}^{(t+1)} T_{ij} x_{ijhk}^{(t)}\right) \geq p_k, \quad i = 1, \dots, I \quad k = 1, \dots, N_i, \quad (3.37)$$

$$\sum_{h \geq k} x_{ijhk}^{(t)} = 1, \quad i = 1, \dots, I \quad j = 1, \dots, n_i. \quad (3.38)$$

Ez a sztochasztikus programozási modell több szempontból is rugalmasan alakítható:

- ha például a modellt egyetlen útcsoportra kívánjuk alkalmazni, vagy az egyes útcsoportokra külön-külön, akkor a modellben az i indextől kell csupán eltekinteni,
- több időperiódust átölelő optimalizálási modell is könnyen megfogalmazható lenne, ehhez segítséget jelent a fenti egy időperiódusos modellben a t idő index alkalmazása, melynek az egy időperiódusos modellben nincs is igazi jelentősége.

II. Eredményeim

4. Autópálya PMS modell kidolgozása

A modell kialakításakor a mérnöki megfontolásokon alapuló rangsoroló eljárás alkalmazását választottuk. Eszerint 25 éves hosszúsági időszakra meghatározzuk a műszaki-gazdasági szempontból legkedvezőbbnek tartott beavatkozást és ezek költségeit. Ezt összes költségük és hasznuk szempontjából összevetjük azzal a megoldással (beavatkozás-kombinációval), amelyet forráshiány esetén alkalmazunk. Ezt minden útszakaszra elvégezve a haszon/költség tényezők a szakaszokhoz tételesen hozzárendelhetők. Ezeket sorba rendezve a beavatkozások fontossága rangsorolható. A teljes éves bekerülési költség adja a legkedvezőbb megoldás éves forrásigényét. Ha ennél kevesebb forrás (anyagi eszköz) áll rendelkezésre, akkor meghatározhatók a rendelkezésre álló forrásból megvalósítható munkák, valamint a forráshiányból adódó veszteségek.

A modell kialakítása

A hazai gyorsforgalmi utak az országos közúthálózat részét képezik, fő feladatuk nem különbözik a hálózat egyéb részének funkciójától. Van azonban néhány olyan jellemző tulajdonság, amit a gyorsforgalmi utak burkolatgazdálkodásánál figyelembe kell venni:

- A törvényesen megengedett – és a ténylegesen kifejtett – sebesség jóval meghaladja a hálózat egyéb részén tapasztaltat, ez hangsúlyosabbá teszi a forgalombiztonság kérdését.
- Az egy irányban haladó forgalmat kiszolgáló forgalmi sávok száma egynél több, ami a köztük levő forgalommegosztás problémáját hozza magával.
- A gyorsforgalmi hálózat részét képezik a leállósávok és a csomóponti ágak, amelyeket szintén be kell a rendszerbe illeszteni.
- Az állapotjellemzések gyakorlata eltér a hálózat többi részétől.
- A pályaszerkezet, elsősorban a kopóréteg jellegzetes típusai eltérnek az egyéb közutakétól.
- Az autópályákon és az autóutakon célszerű olyan beavatkozás-típusokat részesíteni előnyben, amelynek viszonylag rövid építési ideje és viszonylag hosszú ciklusideje

(élettartama) van, ezzel elősegítve annak a követelménynek a teljesülését, hogy a gyorsforgalmi utakon a folyamatos közlekedést minél kevésbé zavarjuk.

A Gáspár László és Bakó András vezetésével kialakított mérnöki modell a fentieket lehetőség szerint maximálisan figyelembe vette [29]. A modellben alkalmazott paraméterek:

a) Burkolattípusok:

- betonburkolat,
- érdesített homokaszfalt (ÉHA),
- zúzalékos masztix aszfalt (ZMA).

b) Állapotparaméterek és azok jellemzésére használt fokozatok

Betonburkolatok

- felületi egyenetlenség 3 fokozat,
- felületépség 3 fokozat,
- csúszásellenállás 3 fokozat.

Aszfaltburkolatok (mindkét típus)

- felületi egyenetlenség 3 fokozat,
- felületépség 3 fokozat,
- csúszásellenállás 3 fokozat,
- keréknyomvályú mélysége 3 fokozat,
- pályaszerkezet-teherbírás 2 fokozat.

c) A választott vizsgálati időszak hossza: 25 év.

d) Beavatkozás-típusok:

Betonburkolatok

- rutinfenntartás,
- táblalépcső megszüntetése,
- SAMI (feszültségcsökkentő közbenső réteg) és aszfaltréteg építése,
- többretegű aszfalt pályaszerkezet építése,

- átépítés.

Aszfaltburkolatok (mindkét típus)

- rutinfenntartás,
- keréknyomvályú-javítás,
- felületi bevonat (permetezéssel vagy keveréssel technológiával),
- vékony aszfaltréteg építése (esetleg SAMI-val együtt),
- vastag aszfaltréteg (erősítés),
- átépítés.

e) Forgalmi kategóriák:

- kis forgalmú (8000 E/nap/sáv érték alatt),
- nagy forgalmú (8000 E/nap/sáv érték vagy felette).

f) A modellben figyelembe vett költség típusok:

- beavatkozási költségek (előző két év tényköltségeinek súlyozott átlagaként),
- úthasználati költségek (azaz a beavatkozási költségráfordítások révén adódó szolgáltatási színvonal-emelkedésből származó úthasználati költség-megtakarítások).

g) Választott stratégiák:

- csak rutinfenntartás,
- „optimális”, azaz műszaki-gazdasági szempontból legkedvezőbb beavatkozások.

Egyes beavatkozásoknál – technológiai jellegzetességüknek fogva – a minimális alkalmazási hossz és esetenként a szomszédos forgalmi sávra történő kiterjesztés szükségessége a 3. táblázatban látható.

Burkolat-típus	Beavatkozás típusa	Egyetlen sávon is végezhető	A pálya összes forgalmi sávjára csak egy időben végezhető	Minimális beavatkozási hossz (m)
Aszfalt	Keréknyomvályú-javítás	X		10
	Felületi vagy iszapbevonat	X		500
	Kopóréteg javítása	X		100
	Vékonyaszfalt készítése		X	500
	Átépités		X	500
Beton	Táblalépcső megszüntetése	X		20
	SAMI és aszfaltréteg		X	500
	Többrétegű aszfalt		X	500
	Átépités		X	100

3. táblázat Egyes beavatkozás-típusok technológiai korlátai

A mérnöki modell lényegét képezték azok a mátrixok, amelyek minden burkolattípusra (3), minden forgalmi kategóriára (2), a kiinduló állapotkombinációk mindegyikére (betonburkolatoknál $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$, aszfaltburkolatoknál $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 = 162$ kombináció) a 25 éves vizsgálati időszak mindegyik évére megadják:

- a szóba jöhető beavatkozást („csak rutinfenntartásos” stratégiánál a fajlagos kátyúzási mennyiséget, „optimális” stratégiánál a műszaki- gazdasági szempontból legmegfelelőbbnek tartott beavatkozás típusát),
- a fajlagos úthasználói költségek alakulását.

A mérnöki modell alapján én készítettem a feladat számítógépes megoldásához szükséges algoritmusokat, megszerveztem a programot, és vezettem (továbbá részt is vettem benne) a

programozási munkálatokat. Az elkészített programrendszer az alapadatokat részben az országos adatbankból, részben a gyorsforgalmi utakra kialakított állapot-felvételi állományokból kapta [37]. Ebből megtörtént az állományok összefésülése, homogenizálása. Tárolja továbbá a szükséges segédállományokat (állapot-előrebecslés 25 évre burkolattípusonként, forgalmi kategóriánként, rutin és optimális beavatkozás esetén), optimális beavatkozások, rutin beavatkozások, beavatkozási egységkötségek burkolattípusonként 1 m²-re vetítve, úthasználoi egységkötségek burkolattípusonként, forgalmi kategóriánként és állapotképenként 1 m²-re vetítve.

Az optimalizáció elvégzéséhez az optimális beavatkozásokat figyelembe véve ún. projekteket alakítunk ki. Ezen projektek összeállítása során az egymás után következő 100 méteres szakaszokat, illetve az egymás melletti sávokat a beavatkozás-típusoktól is függően összevonhatjuk. A program ezután minden projektre kiszámolja az optimális és a csak rutin beavatkozás melletti összes költséget a 25 éves időszakra. Meghatározza az egyes projektekre az úthasználoi költséget is. Az optimalizáció a befektetési haszon, illetve a költségkülönbség alapján történhet [6, 7].

A számításoknál az alábbi jelöléseket alkalmaztuk:

$bko[i]$ jelöli az optimális, $bkr[i]$ a rutin beavatkozás költségét az i -edik évben, $uto[i]$,illetve $utr[i]$ pedig az i -edik évben a megfelelő úthasználoi költséget, $szho$ a beavatkozás szakaszhossza, $savsz$ a sávok száma, $forg$ pedig a forgalmi kategóriának megfelelő szorzószám, d a diszkonttényező értéke.

A felhasznált összefüggések:

Optimális tevékenység költsége:

$$kopt = \frac{bko[1] \cdot szho \cdot savsz}{100} \quad (5.1)$$

Rutin tevékenység költsége:

$$krut = \frac{bkr[1] \cdot szho \cdot savsz}{100} \quad (5.2)$$

25 évre diszkontált beavatkozási költség optimális beavatkozás esetén:

$$kao = \sum_{i=1}^{25} \frac{bko[i]}{(1+d)^{i-1}} \cdot \frac{szho \cdot savsz}{100} \quad (5.3)$$

25 évre diszkontált beavatkozási költség rutin beavatkozás esetén:

$$kar = \sum_{i=1}^{25} \frac{bkr[i]}{(1+d)^{i-1}} \cdot \frac{szho \cdot savsz}{100}. \quad (5.4)$$

25 évre diszkontált úthasználói költség optimális beavatkozás esetén:

$$uao = \sum_{i=1}^{25} \frac{uto[i]}{(1+d)^{i-1}} \cdot \frac{szho \cdot savsz \cdot forg}{10^8}. \quad (5.5)$$

25 évre diszkontált úthasználói költség rutin beavatkozás esetén:

$$uar = \sum_{i=1}^{25} \frac{utr[i]}{(1+d)^{i-1}} \cdot \frac{szho \cdot savsz \cdot forg}{10^8}. \quad (5.6)$$

Lehajtósávok költsége:

$$lforr = lhossz \cdot lhkolt \cdot lszel. \quad (5.7)$$

Leállósávok költsége:

$$vforr = vhossz \cdot vskolt \cdot vszel. \quad (5.8)$$

Beruházás haszna:

$$berh = \frac{(kar + uar) - (kao + uao)}{kao}. \quad (5.9)$$

Költségkülönbség mutató:

$$kkul = \frac{uar - uao}{kar - kao}. \quad (5.10)$$

A fenti elemek meghatározása után megkapjuk azon projekteket, melyeknél az előírt beavatkozást el kell végezni. Ez határozza meg a forrásigényt. Ha a szükséges forrásnál kevesebb áll rendelkezésre, akkor a rendszer meghatározza a forrásból elvégzendő munkákat és az ebből kimaradó projekteket.

A rendszer a gyorsforgalmú utak forrásigényének és forráselosztásának számítógépes támogatását segíti. Előrejelzi a várható burkolatállapotot, input adatot szolgáltat a szakterület teljes forrásigényének megállapításához, forráshiány esetén az ebből adódó veszteségek megállapításához, továbbá a kezelői szolgáltatások előrebecsléséhez is.

5. A PMS adatbázis háttere

Az útburkolat-gazdálkodás számítógépes megvalósításához elengedhetetlenül szükséges az úttal kapcsolatos adatok megfelelő, naprakész nyilvántartása.

5.1. Autópálya-adatbázis

Már az autópálya PMS kifejlesztésekor kiderült, hogy az akkori OKA (Országos Közúti Adatbank) útdatbázis [7] nem tartalmazza teljes körűen az útburkolat-gazdálkodáshoz szükséges adatokat. Ezért javaslatot tettünk az autópályák gazdálkodási igényeit kielégítő adatbázis létrehozására.

Az adatbázist a Könnyűipari Műszaki Főiskola Informatikai Tanszékének munkatársai, Bakó András vezetésével, elkészítették. A programozási munkálatok az én irányításommal folytak [5].

A megvalósítandó autópálya adatbázisnak ki kellett küszöbölnie az OKA-állományok hiányosságait, ugyanakkor képesnek kellett lennie arra, hogy adatokat szolgáltatson az OKA számára. Az akkori igényeknek megfelelően Windows alatti, grafikus alkalmazást fejlesztettünk ki, megtartva az OKA felé az átjárhatóságot. Fontosnak tartottuk azt, hogy negyedik generációs, modern nyelvet válasszunk, amely megfelelő lehetőséget nyújt az adatok biztonságos és kényelmes kezelésére. Ezért a Microsoft Access adatbázis-kezelő szoftvert alkalmaztuk, amelybe importálhatók az OKA állományai, az adatbázis táblái pedig átalakíthatók DBF-állományokká, megvalósítható az OKA számára történő adatszolgáltatás, az SQL lehetőségével pedig könnyen készíthetők lekérdezések.

Az autópálya-adatbázis tábláit (állományait) a következő főbb csoportokba osztottuk:

- szakasz jellegű adatokat tartalmazó állományok,
- pontszerű adatokat tartalmazó állományok,
- baleseti adatok,
- csomópontok nyilvántartása,
- hidak adatainak nyilvántartását tartalmazó állományok.

Az egyes adatok között vannak sávós, pályánkénti, illetve teljes keresztmetszetre vonatkozó táblázatok.

Az egyes táblák adattartamának, a táblák struktúrájának meghatározásánál látható a lényeges változás a régebbi rendszerhez képest, miszerint sokkal több lehetőséget adnak az információs mezők megjegyzések tárolására. A különböző mérések eredetét és minden mérés időpontját is nyilvántartjuk, különösen ügyelve arra, hogy ma már nem elegendő az év utolsó két számjegyének nyilvántartása.

A kialakított új rendszer kiküszöböli az adatok redundáns tárolását, a könnyebb feldolgozhatóság érdekében az adatok nyilvántartását – a mérési adatok származási helye szerint – több kisebb állományra bontja. A lekérdezések gyorsabbá tétele érdekében bizonyos adatokat nemcsak a sávos állományokban, hanem számítottan a pályánkénti, illetve a teljes keresztmetszetre vonatkozó állományoknál is nyilvántartunk. (Ilyenek a forgalmi adatok és a sávonkénti mérési adatokból a pályára átszámolt, aggregált adatok.)

Idősorok kezelése a rendszerben egyszerűsített formában történt. Az elkészített rendszerrel szemben támasztott követelmény arra irányult, hogy minden dátummal azonosított változást archiváljunk, és tegyük lehetővé megtekintésüket szakasz, illetve részzakaszonként időrendben. Az egyes idősoros állományok rendezettségét, azaz megtekintési sorrendjét az alábbiakban ismertetjük. A dátummal rendelkező adatokat megfelelő rendezettségben meg tudjuk jelentetni, így a változások időrendben végigkövethetők.

A dátummal rendelkező változások tételes felsorolásától eltekintünk, csak az adatköröket soroljuk fel.

Ezen adatok köre a következő:

- pályaszerkezeti adatok,
- felületépség,
- pályaszerkezet-teherbírás,
- egyenetlenség, keréknyomvályú, érdesség,
- csúszósurlódás,
- víztelenítés.

A fentieknek megfelelően az idősoros állományok száma 6. Kezdetben az állomány üres. Akkor kerül be a strukturába egy rekord, ha valami változás történt.

Pontosabban az idősoros állomány bővítése úgy történik, hogy egy-egy szakasz, részszerkezet dátummal azonosítható adatának (vagy – csoportos adatok, mérőkocsik esetén – adatainak) változásakor az illető rekordot eltesszük az idősoros állományok valamelyikébe. Az összes módosítás elvégzése után az állományt rendezzük az alább megadott szempontok szerint.

Az állományok rendezettségét az alábbiakban írjuk le:

- pályaadatok: útszám, pályakód, kilométer, méter szelvény, adatnév, dátum (mind növekvő),
- sáv adatok: útszám, pályakód, forgalmi sáv, kilométer, méter szelvény, adatnév, dátum (mind növekvő).

Állománynévként alkalmazzuk az eredeti állományneveket, kibővítve egy kezdő I betűvel, jelezvén, hogy ez a megfelelő állomány idősoros változata.

A rekordszerkezet megegyezik az eredeti állományokban levő rekordszerkezetekkel.

5.2. Városi adatbank létrehozása

A 90-es években elkészült Győr város úthálózatának számítógépes nyilvántartása. Az akkori igényeknek és lehetőségeknek megfelelően az elkészült programrendszer DOS operációs rendszerben működő relációs adatbázisban tárolta az utak, útszakaszok, csomópontok, hidak, stb. adatait. Az informatika fejlődésével szükségessé vált a régi adatbázis olyan formában történő átalakítása, hogy az a mai igényeknek megfeleljen:

- A személyi számítógépeken elterjedt WINDOWS operációs rendszer grafikus felületének kihasználásával felhasználóbarát kezelőfelület alatt működjön.
- Tartalmazza a közlekedési és a városfejlesztési szakemberek által régebben megfogalmazott, a fejlesztésekhez, útkarbantartáshoz, statisztikai feldolgozásokhoz szükséges adatokat.
- Tárolja az egyes csomópontok, szakaszok végpontjainak koordinátáit, hogy a későbbiekben lehetőség legyen az adatbázis felhasználásával az egyes útszakaszok kirajzolására.
- Legyen lehetőség a csomópontok, szakaszok, hidak esetében fényképek, rajzok, azaz grafikus objektumok tárolására is.

- Az állapotminősítő és a forgalmi adatok részletesebb tárolásával nyújtson a korábbiaknál nagyobb segítséget a városfejlesztő szakemberek részére.
- Az adatbázis szerkezete olyan legyen, hogy esetegesen felmerülő újabb igények esetén mind az egyes táblázatok, mind maga az adatbázis – az eredeti struktúra megbontása nélkül – újabb táblázatokkal könnyen bővíthető legyen.
- Olyan adatbázis-kezelő rendszert alkalmazzon, amely Magyarországon elterjedt, egyesíti a relációs adatbázis-kezelés és az objektumorientáltság előnyeit.

A megváltozott igényeknek megfelelően úgy döntöttünk, hogy a könnyen hozzáférhető, negyedik generációs Microsoft Access adatbázis-kezelő rendszert választjuk [11, 12]. Az adatbázis az MS Access 2000 verziójában készült, amely a program készítésekor még nagyon elterjedt volt, de könnyen konvertálható más, újabb verzióra is. A programrendszert én terveztem és készítettem el.

Szükségessé vált az állományok átszervezése az MS Access adatbázis formátumára. Lényeges különbség, hogy míg régebben az egyes táblázatok, a különféle rekordstruktúrák a lemezen különböző állományokban helyezkedtek el, addig itt, az objektumorientált adatbázis esetén egy adatbázisunk van. Tehát egy fizikai állományban helyezkednek el a táblázatok, ami régebben egy fájl volt, az most az adatbázis egy táblája. Külön indexállományok létrehozására sincs szükség, azt, hogy mely mező vagy mezők szerint indexelünk, a táblázatok tervező nézetében állíthatjuk be. Az egyes táblázatok összekapcsolására, a hivatkozási integritás beállítására „az adatbázis-kezelő kapcsolatok beállítása” menüpontban van lehetőség.

Táblázatok

Az adatbázis alapvetően ugyanazokat a táblázatot tartalmazza, mint a DBF fájlok. A redundanciák kiküszöbölése és a könnyebb kezelhetőség érdekében néhány helyen szükség van egyedi kulcsok bevezetésére. Az egyes táblázatok karbantartási funkciójánál ügyelnünk kellett arra, hogy csak megfelelő adat kerülhessen be az egyes mezőkbe. Erre egyrészt a mező feltételeinek beállításánál volt lehetőségünk, másrészt a rendelkezésünkre bocsátott kódleírások alapján létrehoztunk olyan segéd táblázatokat, amelyek garantálják, hogy csak megfelelő érték kerülhet az egyes mezőkbe.

Célunk volt annak biztosítása, hogy az adatbázist sokrétűen felhasználhassuk. Ezért mind a forgalmi viszonyokat, mind az úthálózat állapotminősítő paramétereit a korábbi programoknál részletesebben tároljuk. Ez lehetőséget nyújt arra, hogy a továbbiakban állapotjavító

beavatkozások tervezésénél, az útburkolat-gazdálkodásnál a jelenlegi adatbázist felhasználhassuk.

Az adatbázis négy táblájánál képek tárolására is lehetőséget biztosítottunk. Ezek a képek az űrlapokon is megjeleníthetők. A képeket tartalmazó táblák az alábbiak:

- hídtörzs tábla,
- csomópont azonosító adatait tartalmazó tábla,
- szakasz alapadatainak táblája,
- részzakasz táblája.

Az egyes képek a forgalomról, az állapotról, illetve az elhelyezkedésről adnak felvilágosítást.

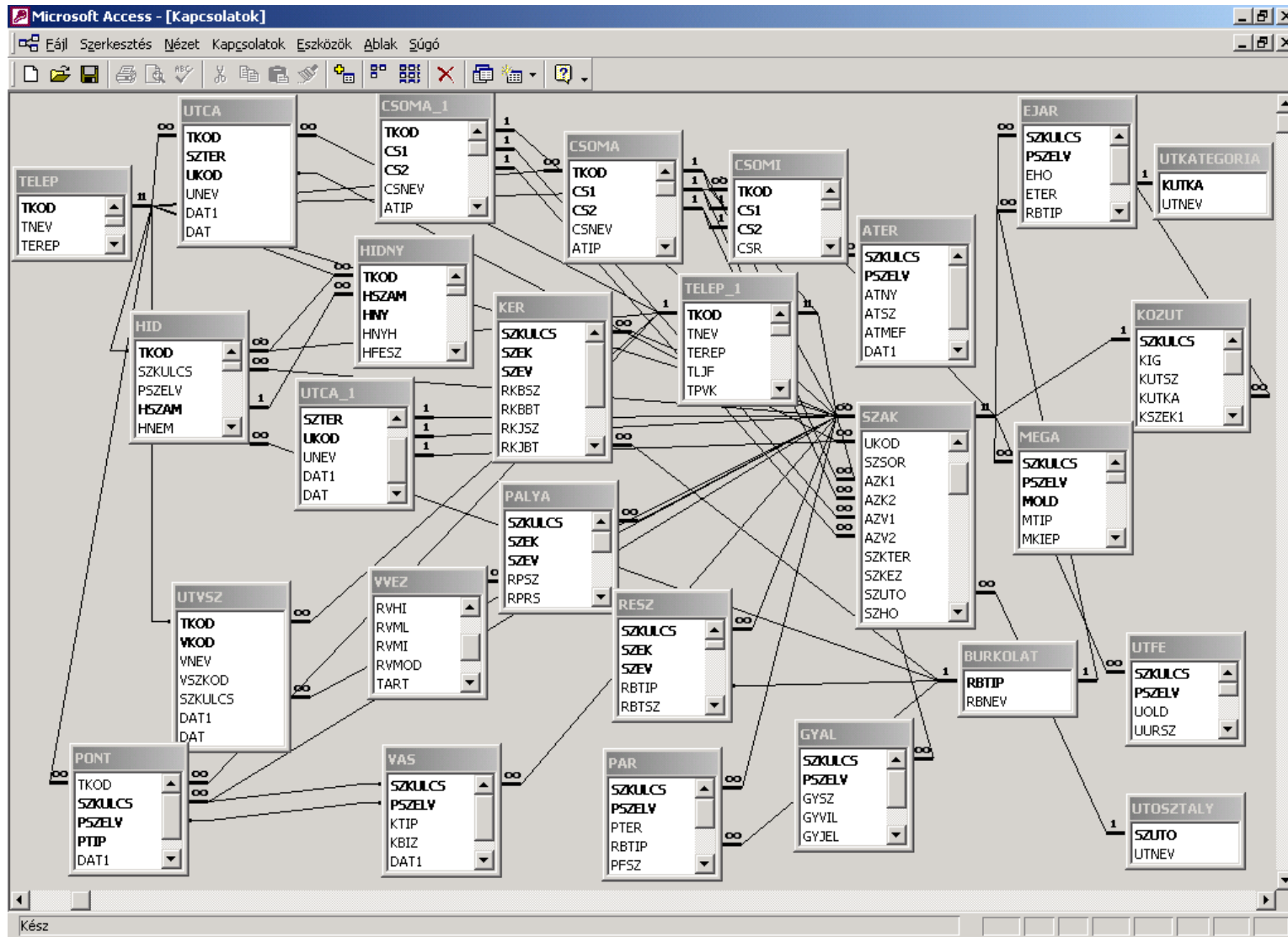
A csomópontoknál tároljuk a pontok koordinátáit is. Ez lehetőséget nyújt arra, hogy az adatbázist rajzoló programokkal összekapcsolva a város úthálózatát grafikusán is megjeleníthessük.

Kapcsolatok

Az adatbázisrendszer létrehozásánál a legfontosabb a kapcsolatok megfelelő beállítása. A kapcsolatok helyes beállítása nélkül a lekérdezések nem működnek helyesen. Adatfelvitel is csak a megfelelő kapcsolatok létrehozása mellett lehetséges. Különösen fontos az adatintegritási szabályok beállítása az 1:N kapcsolatokban, hogy esetleges módosítás, kódváltoztatás után a mezők megfelelő módon frissüljenek.

Az adatbázis táblái között sokféle kapcsolat van. Az egyes kódtáblázatok a hozzájuk rendelt táblákkal „egy – sok” kapcsolatban vannak. A megfelelő kódértéket listából választhatjuk ki.

Az adatbázis „fő” táblái között is sokrétű, részben „egy – egy”, részben „egy – sok” kapcsolat van. Az adatbázis kapcsolatrendszerét a 6. ábra szemlélteti. A jobb áttekinthetőség érdekében csak a fő táblák egymással való kapcsolatait szemléltetjük, a kódtáblázatokét nem.



6. ábra A táblák kapcsolatai a városi adatbankban [10]

Adatkarbantartás

Az adatbázis valamennyi főablájához elkészítettük a karbantartó űrlapot. Az adatok helyességének biztosításához felvettük az adatbázisba azokat a segédtablákat is, amelyek a kódértékeket tartalmazzák. Az űrlapoknál beállítottuk, hogy mindazok a mezők, amelyek csak meghatározott értékeket vehetnek fel, a felvehető értékeket kombinált listából, a segédtablázat adatainak felhasználásával nyerjük. A kódok általában nem változnak, így arra nem adtunk lehetőséget, hogy a felhasználó módosítsa ezeket.

Az egyes űrlapoknál lehetőség van az adatok módosítására és új adatok, új rekordok bevitelére is. A kapcsolatok megfelelő beállításával – hivatkozási integritás megőrzése – arról gondoskodtunk, hogy csak létező szakaszra, csomópontra lehessen adatokat bevinni. A távolságok, szelvények beállításánál ügyelni kell arra, hogy a bevitt adat valós legyen. Az űrlapokat úgy készítettük, hogy nem a mezőnevet, hanem a mező leírását tettük ki az űrlapra.

Néhány, az útburkolat-gazdálkodáshoz szükséges adatok bevitelét támogató űrlap:

The screenshot shows a form titled 'Részszakasz' with a grid of input fields. The fields include:

Szakaszkulcs	<input type="text"/>	Sávk. úttengely	<input type="text"/>	Jobb. járda szél.	<input type="text"/>
Kezdőszelvény	<input type="text"/>	Sávkép. jobbold.	<input type="text"/>	Jobb. járda burk.	<input type="text"/>
Végyszelvény	<input type="text"/>	Forg. s. szüks. sz	<input type="text"/>	Járda szüks.	<input type="text"/>
Burkolattípus	<input type="text"/>	Forg. s. bőv. leh.	<input type="text"/>	Vízelv. baloldal	<input type="text"/>
Tényl. széles. (dn)	<input type="text"/>	Kap. sáv. szüks.	<input type="text"/>	Vízelv. jobboldal	<input type="text"/>
Szüks. széles. (dr)	<input type="text"/>	Kap. s. megv. leh	<input type="text"/>	Vízelv. állapota	<input type="text"/>
Koronaszél. (dm)	<input type="text"/>	Várak. s. szüks.	<input type="text"/>	Vízelv. szüks. m.	<input type="text"/>
Burk. állapota	<input type="text"/>	Vár. igény kiel. m	<input type="text"/>	Világítás léte	<input type="text"/>
B. fel. érdesség	<input type="text"/>	Útburk. szél. l.	<input type="text"/>	Világítás módja	<input type="text"/>
Egyenetlenség	<input type="text"/>	Bal. járda szél.	<input type="text"/>	Világítás helye	<input type="text"/>
Földút kiép. ig.	<input type="text"/>	Bal. járda burk.	<input type="text"/>	Tulajdonos kódja	<input type="text"/>
Sávképlet balold.	<input type="text"/>				

At the bottom, there is a record navigation bar with 'Rekord: 1' and 'összesen 4065'.

The screenshot shows a form titled 'Részszakasz' with a few input fields and a large empty area. The fields include:

Tertület	<input type="text"/>	R_nézet	<input type="text"/>
Helyrajzi szám	<input type="text"/>		
Tartalék	<input type="text"/>		
Dátum	<input type="text"/>		

At the bottom, there is a record navigation bar with 'Rekord: 1' and 'összesen 4065'.

7. ábra Részszakasz adatainak rögzítésére szolgáló űrlap

Szakasz

Szakaszkulcs	<input type="text" value="1"/>	Szakaszhossz(m)	<input type="text" value="37"/>	Kp. kany. f. sz. f.	<input type="text" value="0"/>
Település	<input type="text" value="01"/>	Forg. rend	<input type="text" value="0"/>	Vpont észl. sz. f.	<input type="text" value="0"/>
Területjelleg	<input type="text" value="1"/>	Forg. irány	<input type="text" value="3"/>	Vp. áttek. sz. f.	<input type="text" value="0"/>
Utca	<input type="text" value="42"/>	Tömegközl.	<input type="text"/>	Vp. kany. f. sz.f.	<input type="text" value="0"/>
Utcaszak. sorsz.	<input type="text" value="10"/>	Terepjelleg	<input type="text" value="1"/>	Kp. f. kany. f. ir.	<input type="text" value="0"/>
Kpont térképsz.	<input type="text" value="41413"/>	Beépítettség	<input type="text" value="3"/>	Vp. f. kany. f. ir.	<input type="text" value="0"/>
Kpont sorszám	<input type="text" value="57"/>	Körny. körülm.	<input type="text" value="B"/>	Teherírás oszt.	<input type="text" value="0"/>
Vpont térképsz.	<input type="text" value="41413"/>	Tengelyt. korl.	<input type="text" value="0"/>	Talajfajta	<input type="text" value="2"/>
Vpont sorszám	<input type="text" value="49"/>	Összterh. korl.	<input type="text" value="0"/>	Forg.száml. mut.	<input type="text" value="0"/>
KRESZ ter.j.	<input type="text" value="2"/>	Kpont észl. sz. f.	<input type="text" value="0"/>	Baleseti mut.	<input type="text" value="0"/>
Kezelő	<input type="text" value="1"/>	Kp. áttek. sz. f.	<input type="text" value="0"/>	Átl. napi forg.	<input type="text"/>
Útosztály	<input type="text" value="5"/>				

Rekord: összesen 3625

Szakasz

Tartalék	<input type="text"/>	SZ_nézet	<input type="text"/>
Dátum	<input type="text"/>		
Teherbírás	<input type="text" value="2"/>		
Forg_személy gk	<input type="text" value="0"/>		
Forg_nagy tgk	<input type="text" value="0"/>		
Forg_kis tgk	<input type="text" value="0"/>		
Forg_busz	<input type="text" value="0"/>		

Rekord: összesen 3625

8. ábra Szakasz adatai

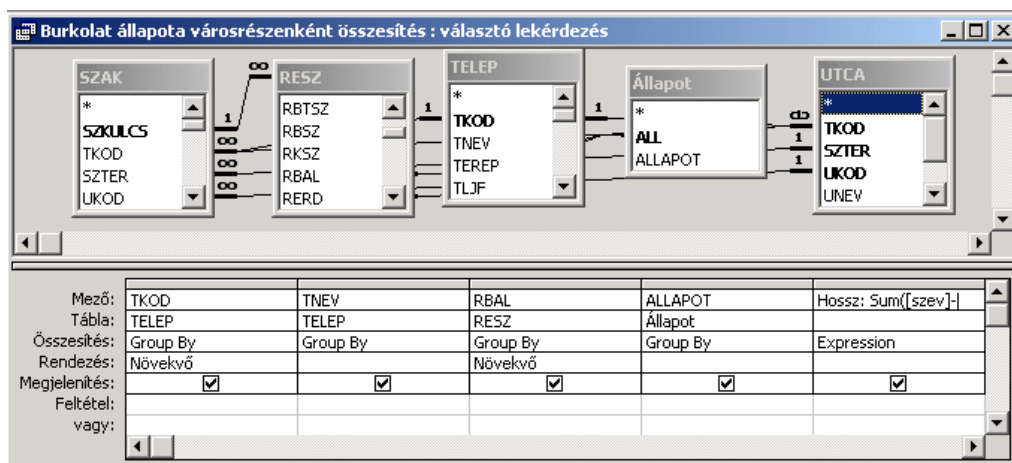
Lekérdezések, jelentések

Néhány, az adatbázisban jelenleg elkészített, tetszőlegesen bővíthető lekérdezés és a hozzájuk kapcsolódó jelentések:

- Belterületi közutak kiépítettsége,
- Burkolat állapota városrészenként, összesítéssel is,
- Burkolat egyenetlensége városrészenként, összesítéssel is,
- Burkolat érdessége városrészenként, összesítéssel is,
- Burkolatfajtánként hossz, terület,
- Járdák területe,

- Közutak hossza,
- Közúthálózat,
- Szakaszok csomópontjai,
- Teherbírások,
- Településenkénti burkolathosszak,
- Utca - szakasz végpontokkal.

Az útburkolat-gazdálkodásnál használható lekérdezések közül szemléltetnek néhányat a következő ábrák:



	TKOD	TNEV	RBAL	ALLAPOT	Hossz (m)
▶ 01		GYŐR-BELVÁROS	0	nincs adat	494
01		GYŐR-BELVÁROS	1	jó	2 813
01		GYŐR-BELVÁROS	2	megfelelő	1 087
01		GYŐR-BELVÁROS	3	tűrhető	33
02		GYŐR-GYÁRVÁROS	0	nincs adat	895
02		GYŐR-GYÁRVÁROS	1	jó	1 646
02		GYŐR-GYÁRVÁROS	2	megfelelő	3 090
02		GYŐR-GYÁRVÁROS	3	tűrhető	1 545
02		GYŐR-GYÁRVÁROS	4	nem megfelelő	247
03		GYŐR-LIKÓCS	0	nincs adat	194
03		GYŐR-LIKÓCS	1	jó	827
03		GYŐR-LIKÓCS	2	megfelelő	300
03		GYŐR-LIKÓCS	3	tűrhető	102

Rekord: 1 összesen 60

9. ábra Burkolat állapota városrészenként összesítés

TNEV	UNEV	SZKULCS	SZEK	SZEV	REGY	EGYENETLENSEI
GYŐR-BELVÁROS	BENCZUR U	43	0	147	1	jó
GYŐR-BELVÁROS	SZT. ISTVAN U	3404	0	120	1	jó
GYŐR-BELVÁROS	SZT. ISTVAN U	3405	0	60	1	jó
GYŐR-BELVÁROS	SZT. ISTVAN U	3406	0	175	1	jó
GYŐR-BELVÁROS	82 SZ U	3433	0	220	1	jó
GYŐR-BELVÁROS	BATTHYÁNY TÉR	4270	0	70	1	jó
GYŐR-BELVÁROS	BÉCSI KAPU TÉR	146	0	60	2	tűrhető
GYŐR-BELVÁROS	KENYÉR KÖZ	128	0	24	2	tűrhető
GYŐR-BELVÁROS	KISFALUDY U	129	0	105	2	tűrhető
GYŐR-BELVÁROS	BÉCSI KAPU TÉR	145	0	21	2	tűrhető
GYŐR-BELVÁROS	BAROSS U	157	0	37	2	tűrhető
GYŐR-BELVÁROS	KISS J U	139	0	96	2	tűrhető
GYŐR-BELVÁROS	KISS J U	138	0	64	2	tűrhető
GYŐR-BELVÁROS	KISS J U	137	0	81	2	tűrhető

Rekord: 1 összesen 385

10. ábra Burkolat egyenetlensége városrészenként

TKOD	TNEV	SZTO	TEHERBIRAS	Összes hossz (m)
01	GYŐR-BELVÁROS	0	nincs adat	23 769
01	GYŐR-BELVÁROS	1	jó	857
01	GYŐR-BELVÁROS	2	megfelelő	892
01	GYŐR-BELVÁROS	3	tűrhető	785
01	GYŐR-BELVÁROS	4	gyenge (a tervezett élettartam végén)	185
01	GYŐR-BELVÁROS	5	nagyon gyenge	276
02	GYŐR-GYÁRVÁROS	0	nincs adat	15 923
02	GYŐR-GYÁRVÁROS	1	jó	3 589
02	GYŐR-GYÁRVÁROS	2	megfelelő	2 183
02	GYŐR-GYÁRVÁROS	3	tűrhető	640
02	GYŐR-GYÁRVÁROS	4	gyenge (a tervezett élettartam végén)	3 086
02	GYŐR-GYÁRVÁROS	5	nagyon gyenge	1 490
03	GYŐR-LIKÓCS	0	nincs adat	6 725
03	GYŐR-LIKÓCS	3	tűrhető	1 574

Rekord: 1 összesen 56

11. ábra Teherbírások

A közúti adatbázis legutóbbi verziója modern eszközökkel megvalósult. Üzemeltetésére államilag finanszírozott, szakképzett személyzet áll rendelkezésre. Adatok folyamatos módosítása, az állapotfelvételek biztosítják a naprakész működés feltételeit.

Települések esetén a helyzet általánosan nem megoldott. Majdnem két évtizede elkészült egy rendszer, ami akkor korszerű volt, Dbase nyelven készült. A szoftver azóta elavult, szükséges egy modernebb rendszerrel történő helyettesítése. A települési útgazdálkodás irányítására hazánkban központi szerv nem létezik, ilyen célú pénzügyi támogatás is hiányzik. Az üzemeltetés szakemberhiány és megfelelő anyagi eszközök hiányában nem megoldott. Egy megyei jogú város esetén is csak egy-két munkatárs foglalkozik az utak problémáival, az ő energiájukat pedig a szakhatósági és egyéb adminisztrációs munka teljes egészében lefoglalja.

A fenti adatbázis létrehozását a Győri Önkormányzat finanszírozta. A rendelkezésre álló forrásokból adatfelvételre nem kerülhetett sor, az adatokat a korábbi rendszerből vettük át. A városi struktúra és a koordináták korábbi térkép digitalizálásával került a rendszerbe.

A program tetszés szerinti részhalmozást tud választani az előírt adatokkal együtt. Ezt grafikus rendszernek átadva a rajzi, térképi megjelenítés is megoldható. Az igazi megoldás persze egy GIS-rendszer lenne, de ennek beszerzése, betanítása nagyságrendekkel több erőforrást igényel.

További lehetőség, hogy az ACCESS lehetővé teszi a képek, mozgóképek kezelését is. Ezzel a csomópontok, a láthatóság, a forgalmi jelzőtáblák, a forgalmi viszonyok, az útállapot vizuálisan is megjeleníthető, kezelhető.

A másik nagy előny, hogy az input adatok a Városi Út és Közműhálózat Gazdálkodási Rendszerhez könnyen előállíthatók. Ez utóbbi rendszer alkalmazása közép- és hosszútávon jelentős megtakarítást eredményez, és hozzájárul sok felesleges, párhuzamos munka elkerüléséhez (pl. sorozatos útburkolatbontások).

Az adatbázis nagy előnye az, hogy a benne tárolt adatok lehetővé teszik az útburkolat-gazdálkodáshoz szükséges adatok előállítását.

6. Forgalomfüggő útburkolat-gazdálkodási modell

A közutak vagyongazdálkodásának közismert két fő célja a vagyongörzés és az úthasználói igények minél nagyobb mértékű folyamatos kielégítése. A korábbi, hosszabb távra készített modellek hiányossága, hogy sem a forgalom, sem az útpálya-szerkezet megváltozását, sem pedig az időközbeni tényleges állapotleromlást nem veszik figyelembe. A forgalmi változásokat és a burkolatállapot változását figyelembe vevő útgazdálkodási javaslatom segíti a hatékony vagyongazdálkodást. A strukturális változások, az előző évben elvégzett munkák figyelembevételével az optimális beavatkozások meghatározásához realisabb forráselosztást tesz lehetővé.

A különféle útburkolat-gazdálkodási modelleknél használatos főbb mutatókat, paramétereket és beavatkozásokat a 4. táblázatban foglalhatjuk össze.

Megnevezés	Típus	Leírás
IRI	Minőségi mutató	Szerkezeti egyenetlenség indexe. A biztonsággal és az utazási kényelemmel kapcsolatos
CRT	Minőségi mutató	Keresztmetszeti súrlódási együttható. A gépkocsi kereke és az útfelület közötti tapadást minősíti.
Behajlás	Minőségi mutató	A burkolat rugalmas deformációjának mértéke terhelés közben. Az útburkolat szerkezeti állapotát minősíti.
ADT (ÁNF)	Paraméter	Átlagos napi forgalom. Az utak forgalmi terhelését adja meg.
Útburkolat típusa	Jellemző	Az útburkolat felépítéséhez használt anyagra jellemző-
Szerkezet	Jellemző	Meghatározza a víz- és a zajelvezető kapacitást. A biztonsággal és az utazási kényelemmel kapcsolatos mutató.
Útfenntartási technikák		A burkolat javításának vagy felújításának terve. A fenntartási technikák javítják az aktuális állapothoz tartozó paramétereket.

4. táblázat Főbb mutatók, paraméterek és burkolatbeavatkozások

6.1. *Heurisztikus modell*

Az egyperiódusos modelleknél pontosabb eredményt szolgáltatnak a jelenre nézve a többperiódusos modellek, mivel a leromlási folyamatokat, a közlekedők (úthasználók) költségeit, illetve hasznát több időperiódusra előre vetítve veszik figyelembe.

A hagyományos heurisztikus vagy matematikai optimalizációs útburkolat-gazdálkodási modellek a kezdeti állapotból indulnak ki.

A figyelembe vett állapotjellemező adatok általában:

- hosszirányú felületi egyenetlenség,
- keresztirányú felületi egyenetlenség – keréknyomvályú-mélység,
- pályaszerkezet-teherbírás,
- makro-, mikroérdesség, illetve csúszásellenállás,
- felületépség (burkolatállapot).

Az útállapotot 3 fokozatú osztályozattal jellemzik, ahol 1 jelöli a legjobb, 3 pedig a legrosszabb értéket. A számítások során figyelembe vett (veendő) további adatok:

- burkolattípus,
- forgalom,
- baleset,
- víztelenítés állapota,
- esetleg terepjelleg, tömegközlekedés, forgalmi rend, stb.

Beavatkozási szükségletek:

- egyáltalán nincs szükség beavatkozásra,
- lokális beavatkozás szükséges (kátyúzás, repedéskiöntés, keréknyomvályújavítás),
- nagy felületű beavatkozás (felületi bevonat),
- pályaszerkezet-erősítés (pl. hengerelt aszfalttal),
- átépítés (pályaszerkezet-csere).

Három forgalmi kategóriát alkalmazunk:

- kis forgalom – max. 1000 motoros jármű/nap/sáv, max. 10% nehézgépjármű,
- közepes forgalom – max. 1000 motoros jármű/nap/sáv, több mint 10% nehézgépjármű,
- nagy forgalom – min. 2000 motoros jármű/nap/sáv, vagy 1001-2000 motoros jármű/nap/sáv, több mint 10,1% nehézgépjármű.

Közvetett inputok:

- beavatkozási technológia változatok,
- beavatkozási egységköltések,
- pályaszerkezetek, burkolatok viselkedésének változása a forgalom függvényében,
- a beavatkozások utáni időszak fenntartási–üzemeltetési egységköltései,
- közlekedési egységköltések,
- a burkolaton kívüli tevékenységek egységköltései, ill. azok előnye, haszna,
- ún. harmadik fél (környezetvédelem, turizmus, idegenforgalom, áruszállítás, kereskedelem-élénkítés, stb.) költsége, illetve haszna.

Egyik legfontosabb input adat: a költségvetési keret. A modellben a javasolt vizsgálati időszak az útburkolat várható élettartamának megfelelően 10 (esetleg távlati modell esetén 25 év). A vizsgált állapotjellemző alapján az útszakaszokat rangsoroljuk, meghatározzuk a szükséges beavatkozásokat, ezek költségét, stb.

A rendszer outputjai:

- megvalósítandó beavatkozások,
- teljes sorolási lista,
- költségkerethez tartozó beavatkozások,
- becsült veszteségek,
- ráfordítások hasznossága.

Nagyon fontos a gazdaságosság szerepe – mi történik, ha a javasolt beavatkozást elvégezzük, ennek milyen költségei és előnyei várhatók. Ha a beavatkozásokhoz rendelkezésünkre álló

forrás kevesebb az igényeknél, mely tevékenységeket hagyhatunk el, ennek milyen a további költségvonzata.

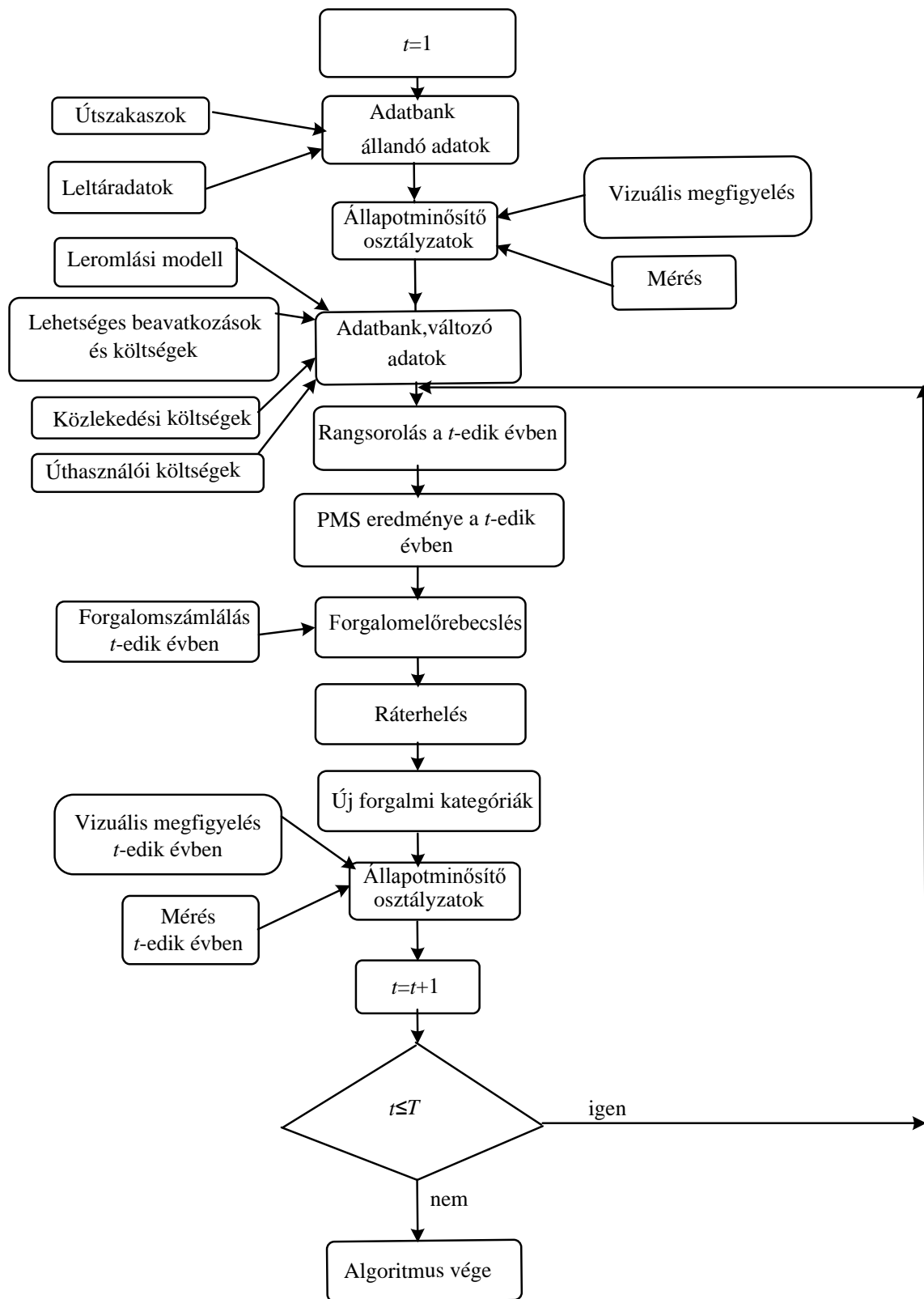
A leromlási folyamatokat előrejelző függvények, illetve a folyamatot leíró Markov-féle mátrix elemei nagymértékben függenek az adott időszak forgalmától. A jelenleg alkalmazott modellekben ezt a forgalmat csak az algoritmus elején, illetve ehhez az időponthoz kötődően vizsgáljuk, és állapítjuk meg az egyes szakaszokra.

Az általam javasolt modellben mind a forgalom változását, mind az időszakonkénti állapotváltozást figyelembe veszem [13, 14]. Így az ún. csúszó tervezés felhasználásával sokkal pontosabban adhatjuk meg a szükséges állapotjavító beavatkozásokat és ezek költségét.

A tervezés általában hosszabb távra, 10 vagy akár 25 évre előre történik. Ez alatt az idő alatt az útpályaszerkezet alapvetően megváltozhat, vagy más, járulékos beruházások – ipari park, bevásárlóközpontok, stb. létesítése az egyes útszakaszok forgalmát lényegesen módosíthatja.

Több időperiódus és rangsoroló eljárás esetén a forgalom változását is figyelembe vevő algoritmust dolgoztam ki, amelynél az egyes periódusok után forgalom-előrebecslést kell végrehajtani, illetve a forgalomszámlálási eredmények és a struktúra esetleges változása alapján módosítani a forgalmat.

A javasolt heurisztikus eljárás algoritmusát a 12. ábra szemlélteti. A vizsgált évek számát T -vel, a futó indexet pedig t -vel jelöljük.



12. ábra Rangsoroló eljárás folyamatábrája

Az algoritmus lényege a következő:

- a) A rendelkezésekre álló adatok alapján rangsoroljuk az útszakaszokat, és meghatározzuk a szükséges beavatkozásokat.
- b) Forgalom-előrebecslést, majd forgalomelosztást végzünk, meghatározzuk a **H** ún. honnan-hová mátrix elemeit, az egyes körzetek közti várható forgalmat.
- c) A forgalmat útszakaszokhoz rendeljük (ráterheljük), figyelembe véve az időközbeni forgalomszámlálás eredményeit is.
- d) A ráterhelés alapján kapott hálózati forgalom megváltozása módosíthatja az egyes útszakaszok kategória besorolását, elvégezzük a szükségessé vált átstrukturálást.
- e) A következő és a további években a rangsoroló eljárás elvégzése után a b) – d) lépéseket minden alkalommal megismételjük a tervezési periódus végéig.

6.2. *Matematikai optimalizációs modell*

A fejezetben a modellt általánosan fogjuk megfogalmazni. A jelölések hasonlóak a korábbi fejezetekben használt jelölésekhez, de némi változás miatt összefoglalóan újra megadjuk őket.

Az optimalizációs modellben az indexekre a következő jelöléseket alkalmazzuk:

- | | |
|-----|---|
| s | burkolattípus – általában kétféle – aszfaltbeton, illetve aszfaltmakadám, de a lehetséges burkolattípusok számát általánosan jelölje S . |
| f | forgalmi kategória – általában 3 – kis, közepes és nagy forgalmat különböztetünk meg, a forgalmi kategóriák számát jelölje F . |
| p | beavatkozás típusa – a lehetséges beavatkozások száma általában 3-8 közötti –, az algoritmusban jelöljük a különböző beavatkozások számát P -vel. |

A leromlások jellemzésére a Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrixot használjuk, melyet **Q**-val jelölünk. A mátrix i -edik sorának j -edik eleme annak a valószínűségét adja meg, hogy a i állapotban lévő útszakasz a tervezési periódus végére átkerül az j állapotba. A Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrix függ a burkolattípustól, a forgalmi kategóriától és a beavatkozás típusától is, így összesen $S \cdot F \cdot P$ különböző **Q** mátrixunk van.

A közlekedési szakemberek által az elmúlt közel 20 évben végzett vizsgálatok a Markov-mátrixok egyes elemeinek olyan meghatározását teszik lehetővé, hogy bár valószínűségi mátrixszal dolgozunk, a modell által szolgáltatott eredményeket determinisztikusaknak tekinthetjük.

A \mathbf{Q} mátrix méretét a burkolatállapot minősítő paraméterek lehetséges értékei alapján kapjuk meg.

A minősítő paramétereket jelölje rendre m_1, m_2, \dots, m_w . Tételezzük fel, hogy az egyes minősítő paraméterek osztályzatainak száma különböző is lehet. Legyenek az m_1 paraméter állapotosztályzatai $1, 2, \dots, u_1$, az m_2 -höz tartozó osztályzatok $1, 2, \dots, u_2$, az m_w paraméterhez pedig tartozzanak az $1, 2, \dots, u_w$ állapotosztályzatok. Ekkor a \mathbf{Q} mátrix mérete $u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_w$.

A gyakorlatban rendszerint csak a fontosabb állapotjellemező paramétereket alkalmazzuk. Az általánosság megszorítása nélkül feltehetjük, hogy az osztályzatok száma minden paraméter esetén azonos. Az állapotjellemező paraméterek legyenek például a következők:

- hosszirányú felületei egyenetlenség,
- keréknyomvályú mélység,
- pályaszerkezet teherbírás,
- csúszásellenállás,
- felületépség.

Ha az állapotosztályzatok száma egységesen 3, akkor $3^5 = 243$ különböző állapotosztályzat lehetséges. Ebben az esetben a \mathbf{Q} mátrix mérete $243 \cdot 243$.

Kiindulásként továbbá feltételezzük, hogy rendelkezésünkre áll a megfelelően feltöltött útdatbázis, azaz az összes utak H halmazára nézve meg tudjuk határozni azt, hogy az egyes útszakasz mely útburkolattípusba, milyen forgalmi kategóriába tartozik és milyen állapotú.

Az előző fejezetekben már használt jelölési rendszert fenntartva \mathbf{d}_s vektor jelölje az s útburkolattípushoz tartozó utak területének százalékos arányát, azaz az első típusú út százalékos aránya \mathbf{d}_1 , a másodiké \mathbf{d}_2 , ..., az S -é pedig \mathbf{d}_S . A vektor elemeinek száma a lehetséges állapotok számával (243) megegyező.

$$\sum_{s=1}^S \mathbf{d}_s = \mathbf{1} \quad (6.1)$$

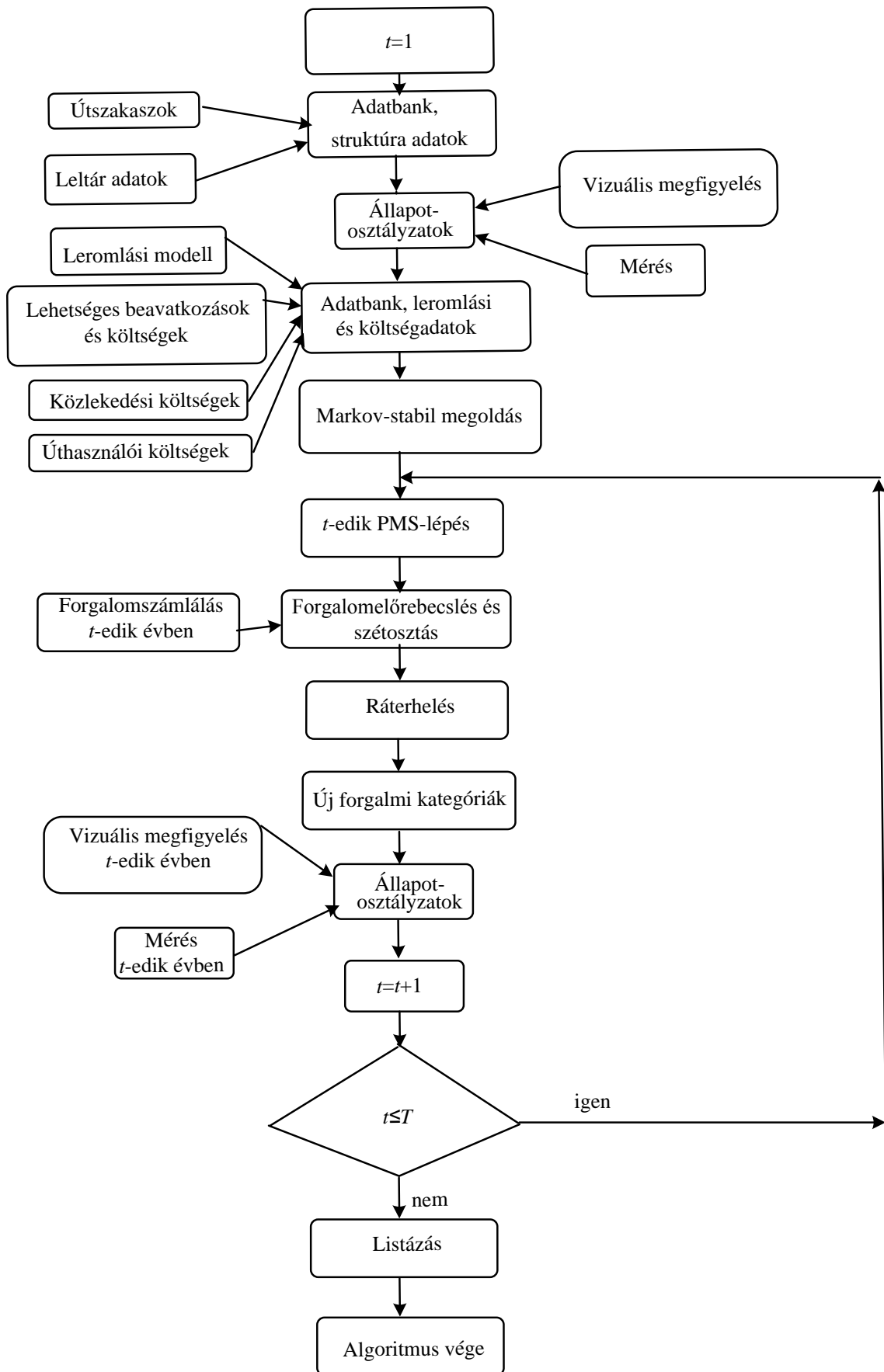
Az f forgalmi típushoz, adott s útburkolattípushoz tartozó utak területarányát jelölje \mathbf{b}_{sf} . Az összes forgalmi típus egy burkolattípus esetén megadja a burkolattípus százalékos arányát, azaz teljesül a következő összefüggés:

$$\sum_{f=1}^F \mathbf{b}_{sf} = \mathbf{d}_s, \quad s = 1, \dots, S. \quad (6.2)$$

Jelölje \mathbf{X}_{sfp} az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához és a p beavatkozás típushoz tartozó vektort. A vektor i -edik koordinátája X_{sfp}^i az s, f, p indexekhez tartozó utak i -edik állapotban levő részére azt mondja meg, hogy ezen utak hány százalékán kell a p beavatkozást végrehajtani. A továbbiakban a koordinátákat külön nem jelöljük, az egyenletekben a teljes vektorokat szerepeltetjük.

A továbbiakban összefoglalom az új algoritmus főbb lépéseit [15, 16]. A forgalom változását figyelembe nem vevő optimalizációs eljárás során két feladatot oldottunk meg: a stabil modellt és a többperiódusos eljárást. A stabil modell megoldása az időperiódus végére a legjobbnak ítélt állapoteloszlást szolgáltatja. A többperiódusú modell pedig az időperiódusonkénti beavatkozásokat adja meg minden s, f esetre, ez a modell a legnagyobb leromlást okozó forgalomnagyság változását (elsősorban a nehézgépjármű forgalom változását) nem veszi figyelembe. Az új modell időperiódusonként meghatározza a forgalomváltozást és az ehhez tartozó új állapoteloszlást. A következő lépésben az új periódushoz tartozó olyan optimális megoldást keresek, amely valamilyen mértékben közelít a stabil megoldáshoz. Itt az abszolút érték mértéket alkalmazom. A modell lépéseinek részletezését a 13. ábrán mutatom be.

Az útgazdálkodási modellben olyan célfüggvényt javaslok, amely a Markov-stabil modell eredményétől való eltérés abszolút értékét minimalizálja, fázisonként közelít a Markov-stabil modellhez. Ehhez átfogalmaztam az abszolút érték eltérést, és így a célfüggvény ebben a modellben is lineáris.



13. ábra Módosított Markov-modell

Az algoritmus során elsőként az úgynevezett Markov-stabil megoldást határozzuk meg, amely feltétel azt fejezi ki, hogy a tervezési periódus végére kapott eloszlás megegyezzen a tervezési periódus elején lévő eloszlással [17, 18].

A Markov-stabilitást biztosító feltétel:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{Q}_{sfp} - \mathbf{U}) \mathbf{X}_{sfp} = \mathbf{0}, \quad (6.3)$$

ahol \mathbf{U} a Markov-féle mátrixokkal megegyező méretű egységmátrix. Továbbá:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_{sfp} = \mathbf{1}, \quad (6.4)$$

azaz valamilyen beavatkozást minden szakaszon el kell végezni.

Az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához és a p beavatkozáshoz tartozó beavatkozási egységköltség vektort jelölje \mathbf{C}_{sfp} . Ekkor a Markov-stabil megoldáshoz tartozó célfüggvény, amely a beavatkozási költségek minimalizálására törekszik:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_{sfp} \mathbf{C}_{sfp} \rightarrow \min. \quad (6.5)$$

A Markov-stabil megoldáshoz tartozó vektorokat jelöljük $\bar{\mathbf{X}}_{sfp}$ -vel.

A többperiódusú modellben egy új indexet vezetünk be az aktuális időperiódus jelölésére, legyen ez t , az időperiódusok számát pedig jelölje T . Így az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához és a p beavatkozás típusához tartozó ismeretlen vektort a t -edik évben \mathbf{X}_{sftp} jelöli.

Ennek X_{sftp}^i eleme az i -edik állapotképhez tartozó területi hányadot jelenti a t -edik évben.

Több típusú célfüggvényt is meg tudunk fogalmazni. Az egyik a beavatkozások összegének minimalizálása. Itt az s burkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához és p beavatkozáshoz tartozó beavatkozási költség vagy rögzített az egész tervezési időszakra, vagy időperiódusonként változó. Az előbbi költséget jelölje \mathbf{C}_{sfp} .

A változó költség is kétfajta lehet:

- az egyik típusnál feltételezzük, hogy az infláció mértéke (költségváltozás) minden időperiódus esetén azonos, azaz a t -edik évben a beruházási egységköltség vektor \mathbf{C}_{sfp} helyett $r^{t-1}\mathbf{C}_{\text{sfp}}$, ahol r az inflációs rátának megfelelő diszkontálási együttható;
- a másik költségtípus esetén a költség függ az időperiódustól, azaz változó inflációval számolunk, jelölje ezt a költségvektort \mathbf{C}_{sftp} .

A beavatkozási költségeken kívül figyelembe vehetjük még az ún. úthasználói költséget is. Az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához tartozó úthasználói egységköltség vektort jelölje \mathbf{K}_{sf} .

Jelölje \mathbf{Y}_{sft} az s útburkolattípushoz, az f forgalmi kategóriához tartozó útszakaszok területi hányadát a t -edik évben elvégzett beavatkozások után.

A Markov-stabil megoldás meghatározása után az első évben a következő feltételeknek kell eleget tennünk:

Olyan kiindulási \mathbf{X} vektort kell választanunk, amelynek területi hányadai megegyeznek a kezdeti év területi hányadaival:

$$\sum_{p=1}^P \mathbf{U}\mathbf{X}_{\text{sfp}1} = \mathbf{b}_{\text{sf}}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad (6.6)$$

ahol \mathbf{U} a már említett egységmátrix.

A másik feltétel az első tervezési év végére adja meg a területi hányadokat. Ezzel az első év végén meghatározzuk az \mathbf{Y}_{sft} területi hányad vektort.

$$\sum_{p=1}^P \mathbf{Q}_{\text{sfp}} \mathbf{X}_{\text{sfp}1} = \mathbf{Y}_{\text{sfp}1}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F. \quad (6.7)$$

Minden szakasszal valamilyen beavatkozást végzünk, tehát:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_{\text{sfp}1} = \mathbf{1}. \quad (6.8)$$

Ezen feltételek mellett most a lépésenkénti optimalizációs modellben az új célfüggvény a Markov-stabil megoldáshoz tartozó költség és az aktuális megoldáshoz tartozó költség

eltérésének a minimalizálása. Azaz időperiódusonként az alábbi célfüggvényt kell minimalizálni:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sftp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} \right| \rightarrow \min, \quad t = 1, \dots, T. \quad (6.9)$$

A fenti célfüggvényt átfogalmazva ezt a feladatot is megfogalmazhatjuk lineáris programozási modellként. A linearizáláshoz időperiódusonként $2 \cdot S \cdot F \cdot P$ mesterséges változó vektorot vezetünk be. A t -edik időperiódus esetén jelöljük ezeket a vektorokat \mathbf{u}_{sftp} , illetve \mathbf{v}_{sftp} -vel.

Ezen jelölések mellett a következő átalakítást végezzük el:

$$\mathbf{u}_{\text{sftp}} - \mathbf{v}_{\text{sftp}} = \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sftp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}}, \quad \text{ahol } \mathbf{u}_{\text{sftp}} \geq \mathbf{0} \text{ és } \mathbf{v}_{\text{sftp}} \geq \mathbf{0}, \quad (6.10)$$

$$s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad p = 1, \dots, P, \quad t = 1, \dots, T.$$

Az \mathbf{u} , illetve a \mathbf{v} vektorok koordinátái közül csak az egyik lehet 0-tól különböző, attól függően, hogy az abszolút érték jelen belül álló kifejezés értéke pozitív, vagy negatív.

A (6.10) összefüggés felhasználásával a célfüggvény a következőképpen alakul:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{u}_{\text{sftp}} + \mathbf{v}_{\text{sftp}}) \rightarrow \min, \quad t = 1, \dots, T, \quad (6.11)$$

mivel \mathbf{u}_{sftp} és \mathbf{v}_{sftp} koordinátái közül minden esetben csak az egyik lehet 0-tól különböző.

Speciálisan az első évrre:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sfp1}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} \right| \rightarrow \min. \quad (6.12)$$

Azaz mivel

$$\mathbf{u}_{\text{sfp1}} - \mathbf{v}_{\text{sfp1}} = \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sfp1}} \mathbf{C}_{\text{sfp}}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad p = 1, \dots, P, \quad (6.13)$$

ezért

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{u}_{\text{sfp1}} + \mathbf{v}_{\text{sfp1}}) \rightarrow \min. \quad (6.14)$$

Az első évi modell a fentiek alapján a következő:

$$\begin{aligned}
\sum_{p=1}^P \mathbf{U} \mathbf{X}_{\text{sfp}1} &= \mathbf{b}_{\text{sf}}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F \\
\sum_{p=1}^P \mathbf{Q}_{\text{sfp}} \mathbf{X}_{\text{sfp}1} &= \mathbf{Y}_{\text{sfp}1}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F \\
\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_{\text{sfp}1} &= \mathbf{1} \\
\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sfp}1} \mathbf{C}_{\text{sfp}} \right| &\rightarrow \min \\
\mathbf{u}_{\text{sfp}1} - \mathbf{v}_{\text{sfp}1} &= \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sfp}1} \mathbf{C}_{\text{sfp}}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad p = 1, \dots, P \\
\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{u}_{\text{sfp}1} + \mathbf{v}_{\text{sfp}1}) &\rightarrow \min.
\end{aligned} \tag{6.15}$$

Az első év végén a fenti modell lefuttatása után az algoritmus nem a kapott \mathbf{Y}_{sfl} adataival dolgozik tovább. A területi hányadokat ugyanis meghatározza a forgalom-előrebecslés eredménye. Így az s burkolattípushoz, f forgalmi kategóriához tartozó területhányad forgalom-előrebecsléssel határozható meg. Jelöljük az így létrejövő eloszlásvektort a t -edik év végén $\mathbf{Y}_{\text{sft}}^*$ -vel. Megjegyzendő, hogy az állapotleromlás eloszlását az időperiódusonkénti (őszi-tavaszi) állapotfelvétel is módosítja.

A további években az $\mathbf{X}_{\text{sfp}t}$ vektor meghatározásánál a következő feltételeket kell figyelembe vennünk:

$$\sum_{p=1}^P \mathbf{U} \mathbf{X}_{\text{sfp}(t+1)} - \mathbf{Y}_{\text{sft}}^* = \mathbf{0}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T-1. \tag{6.16}$$

Ez a feltétel azt fejezi ki, hogy a t -edik periódus végén kapott területi hányad a $(t+1)$ -edik periódusra a kezdeti eloszlást szolgáltatja.

Valamilyen beavatkozás minden szakaszon történik:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_{\text{sfp}(t+1)} = \mathbf{1}, \quad t = 1, \dots, T-1. \tag{6.17}$$

Az év végi területi hányadokat a Markov-féle mátrix felhasználásával kapjuk:

$$\sum_{p=1}^P \mathbf{Q}_{\text{sfp}} \mathbf{X}_{\text{sfp}(t+1)} = \mathbf{Y}_{\text{sft}(t+1)}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T-1. \tag{6.18}$$

Míg \mathbf{Y}_{sft} jelöli az algoritmus egyes lépéseiben a számítással kapott új területi hányadokat, addig $\mathbf{Y}_{\text{sft}}^*$ minden időperiódusban a korrigált vektort jelöli.

A célfüggvény a t -edik évben a Markov-stabil modell megoldásától való eltérés minimalizálására a következő:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sft}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} \right| \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T. \quad (6.19)$$

A felírt célfüggvényt a már jelzett módon alakíthatjuk át:

$$\mathbf{u}_{\text{sft}} - \mathbf{v}_{\text{sft}} = \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sft}} \mathbf{C}_{\text{sfp}}, \quad \text{ahol } \mathbf{u}_{\text{sft}} \geq \mathbf{0} \text{ és } \mathbf{v}_{\text{sft}} \geq \mathbf{0}, \quad (6.20)$$

$$s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad p = 1, \dots, P, \quad t = 2, \dots, T.$$

Az így kapott lineáris célfüggvény:

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{u}_{\text{sft}} + \mathbf{v}_{\text{sft}}) \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T. \quad (6.21)$$

Az algoritmus minden egyes lépésének végrehajtása után a következőket kell tennünk:

- Az év közbeni forgalomszámlálás adataival a honnan-hová mátrix elemeinek módosítása.
- Forgalom-előrebecslés a következő időperiódusra, azaz az egyes körzetek kiinduló és beérkező forgalmának előrebecslése a vizsgált jövőbeli időpontra: az \bar{o}_i, \bar{d}_j értékek meghatározása. Ezzel ismertté válnak a honnan-hová mátrix sor- és oszlopösszegei.
- Forgalomszétosztás, azaz az új honnan-hová mátrix elemeinek meghatározása. Itt történik a sor- és oszlopösszegek ismeretében a honnan-hová mátrix kitöltése, az elemek meghatározása. A lehetséges eljárásokkal a dolgozatom 2.1 fejezetében foglalkoztam részletesen.
- Ráterhelési eljárás lefuttatása. A honnan-hová mátrix elemeinek ismeretében megtörténik a forgalom útszakaszhoz rendelése, természetesen figyelembe véve az út struktúrájának esetleges megváltozását is. A különböző ráterhelési eljárásokkal a 2.2 fejezetben foglalkoztam, a leggazdaságosabb útvonalak meghatározását pedig az 1. fejezetben részleteztem. A legjobbnak ítélt, általam továbbfejlesztett eljárást az 1.5 fejezetben írtam le.

- Időközi állapotfelvétel adatainak figyelembe vétele az egyes szakaszok burkolatállapotának az állapotfelvétel alapján történő módosítása.
- Ezen lépések után az új forgalomnak megfelelően a forgalmi kategóriák módosulhattak, továbbá az egyes kategóriákba eső útszakaszok aránya is megváltozhatott [19, 20]. Ennek alapján minden időperiódusra megkapjuk az új állapotnak megfelelő $\mathbf{Y}_{\text{sft}}^*$ területi hányadokat, s a következő lépésben már ezen új értékek felhasználásával dolgozunk tovább.

A t -edik időperiódushoz tartozó modell tehát a következőképpen alakul:

$$\begin{aligned}
& \sum_{p=1}^P \mathbf{U} \mathbf{X}_{\text{sfp}(t+1)} - \mathbf{Y}_{\text{sft}}^* = \mathbf{0}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T-1 \\
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_{\text{sfp}(t+1)} = \mathbf{1}, \quad t = 1, \dots, T-1 \\
& \sum_{p=1}^P \mathbf{Q}_{\text{sfp}} \mathbf{X}_{\text{sfp}(t+1)} = \mathbf{Y}_{\text{sf}(t+1)}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T-1 \\
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sfp}t} \mathbf{C}_{\text{sfp}} \right| \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T \\
& \mathbf{u}_{\text{sfp}t} - \mathbf{v}_{\text{sfp}t} = \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfp}} \mathbf{C}_{\text{sfp}} - \mathbf{X}_{\text{sfp}t} \mathbf{C}_{\text{sfp}}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad p = 1, \dots, P, \quad t = 2, \dots, T \\
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{u}_{\text{sfp}t} + \mathbf{v}_{\text{sfp}t}) \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T.
\end{aligned} \tag{6.22}$$

A fentiekben elmondottak alapján az egyes periódusokban különböző célfüggvényeket is megfogalmazhatunk. A fentiekben az egész tervezési periódusra vonatkozóan rögzített beavatkozási költségekkel dolgoztunk.

Amennyiben változó beavatkozási költségeket veszünk figyelembe, az algoritmus első évre vonatkozó része továbbra is változatlan marad. Módosulás a további évek számításainál lesz.

Az egyik költségfüggvény változat a rögzített inflációval dolgozó célfüggvény. Az inflációs ráta értékét r -rel jelölve, az algoritmus a következőképpen fogalmazható meg:

$$\begin{aligned}
& \sum_{p=1}^P \mathbf{U} \mathbf{X}_{\text{sfpt}(t+1)} - \mathbf{Y}_{\text{sft}}^* = \mathbf{0}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T-1 \\
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_{\text{sfpt}(t+1)} = \mathbf{1}, \quad t = 1, \dots, T-1 \\
& \sum_{p=1}^P \mathbf{Q}_{\text{sfpt}} \mathbf{X}_{\text{sfpt}(t+1)} = \mathbf{Y}_{\text{sf}(t+1)}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad t = 1, \dots, T-1 \\
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfpt}} \mathbf{C}_{\text{sfpt}} - \mathbf{X}_{\text{sfpt}} r^{t-1} \mathbf{C}_{\text{sfpt}} \right| \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T \\
& \mathbf{u}_{\text{sfpt}} - \mathbf{v}_{\text{sfpt}} = \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfpt}} \mathbf{C}_{\text{sfpt}} - \mathbf{X}_{\text{sfpt}} r^{t-1} \mathbf{C}_{\text{sfpt}}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad p = 1, \dots, P, \quad t = 2, \dots, T \\
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{u}_{\text{sfpt}} + \mathbf{v}_{\text{sfpt}}) \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T.
\end{aligned} \tag{6.23}$$

A másik változat esetén a költségek függenek a tervezési periódustól. Ekkor az s burkolattípushoz, f forgalmi kategóriához, p beavatkozáshoz tartozó beavatkozási költségvektort a t -edik évben \mathbf{C}_{sfpt} jelöli. Ekkor a célfüggvény a következőképpen fogalmazható meg:

$$\begin{aligned}
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \left| \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfpt}} \mathbf{C}_{\text{sfpt}} - \mathbf{X}_{\text{sfpt}} \mathbf{C}_{\text{sfpt}} \right| \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T \\
& \mathbf{u}_{\text{sfpt}} - \mathbf{v}_{\text{sfpt}} = \bar{\mathbf{X}}_{\text{sfpt}} \mathbf{C}_{\text{sfpt}} - \mathbf{X}_{\text{sfpt}} \mathbf{C}_{\text{sfpt}}, \quad s = 1, \dots, S, \quad f = 1, \dots, F, \quad p = 1, \dots, P, \quad t = 2, \dots, T \tag{6.24} \\
& \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P (\mathbf{u}_{\text{sfpt}} + \mathbf{v}_{\text{sfpt}}) \rightarrow \min, \quad t = 2, \dots, T.
\end{aligned}$$

Az útgazdálkodásnak két fontos célt kell kielégítenie: Az egyik a vagyonmegőrzés, a másik pedig a felhasználó igények minél nagyobb mértékben történő kielégítése. Javaslatom segíti a vagyongazdálkodást. A strukturális változások, az előző évben elvégzett munkák figyelembe vételével realisabb forráselosztást tesz lehetővé az optimális beavatkozások meghatározásához.

7. Mérnöki szerkezetek karbantartásának optimalizációs modellje

A továbbiakban az útburkolat-gazdálkodásra kialakított modell általánosítását mutatom be. A modell általánosítható olyan karbantartási modell esetére, ahol több típusú szerkezet és szerkezetenként nagyszámú alkatrész fordul elő, különböző típusú leromlási lehetőségekkel és igénybevétellel. Az alkalmazhatóság feltétele, hogy az egyes alkatrészek leromlása nemcsak az időtől, hanem a szerkezet kihasználtsági fokától is függjön.

A Mérnöki Szerkezetek Gazdálkodási (Menedzsment) Rendszere a rendelkezésre álló pénzügyi források optimális allokációjára törekszik, abból a célból, hogy a karbantartási, a javítási és a felújítási tevékenységek a leghatékonyabbak legyenek. A cél olyan karbantartási rendszer kidolgozása, amely a szerkezet működőképességét teljes üzemideje alatt minimális költséggel biztosítja. Ez a menedzsment rendszer nem elsősorban számítógépes program, az csak egy részét képezi. A feladat megoldásához szükséges a probléma gyakorlatias, objektív és rendszeres követése, összevetve a gazdasági és a műszaki eszközökkel. A Mérnöki Szerkezetek Menedzsment Rendszere a szervezés és a kivitelezés ésszerű és rendszerszemléletű megközelítése a tervezési szerkesztési és elhelyezési struktúráknál. A menedzsment elmélet alkalmazása az utóbbi két évtizedben terjedt el.

A témához kapcsolódó szoftvereknek az alábbi követelményeknek kell eleget tenniük:

- Olyan adatbázis, amely tartalmazza az összes szükséges információt, beleértve a leltári és az állapot adatokat, valamint a karbantartással, a javítással és a felújítással kapcsolatos információkat és azok hatékonyságát. Ennek az adatbázisnak tartalmaznia kell történeti adatokat (leromlások, múlt- és jövőbeli beavatkozások, köztük felújítások, költségek, stb.) is.
- Magába kell foglalnia a legfontosabb beavatkozási, felújítási és helyettesítő komponenseket (műveleteket, ezek ára, stb.).
- Szerepelniük kell heurisztikus vagy optimalizációs eljárásoknak, amelyek a legolcsóbb beavatkozási és felújítási műveleteket szolgáltatják.
- Tartalmaznia kell a leromlási modellt, amely meghatározza a mérnöki szerkezetek jövőbeli állapotát, a jelenlegi állapot és az idő periódus függvényében.

Ebben a fejezetben a leromlási folyamatról és egy optimalizációs modellről lesz szó.

7.1. Modell kialakítása

Egy mérnöki szerkezetnek (vagy egy részének) minősége általában nem marad állandó az idők folyamán. A szerkezet egyes elemei a működési időtől függően differenciáltan romlanak le. Az egyes elemek élettartama megbecsülhető [62]:

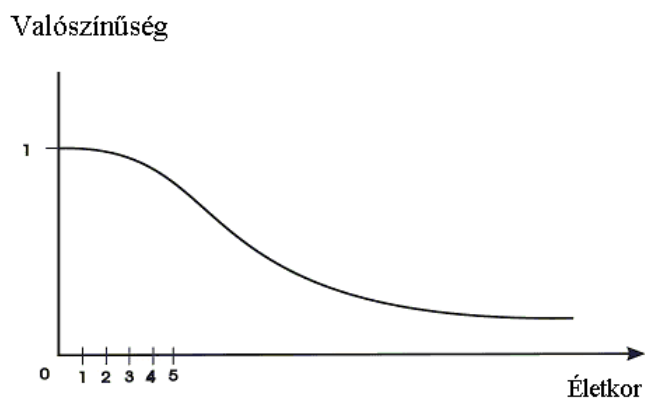
- gyakorlati tapasztalat,
- idősoros adatbázis,
- leromlási modellek alkalmazása,
- laboratóriumi ellenőrzés.

Más megközelítésben [55] négy típus különböztethető meg:

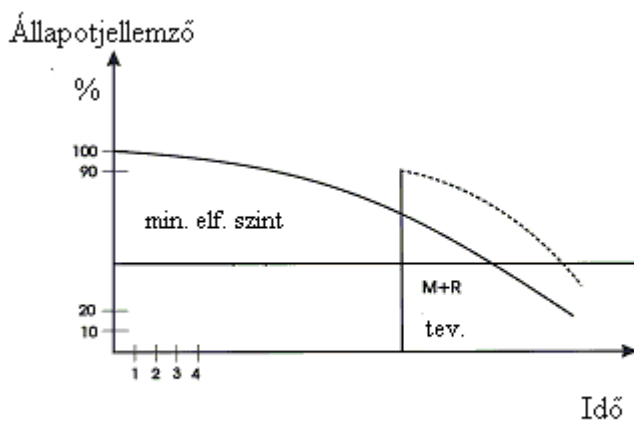
- szubjektív, ahol a leromlást előrejelző modell kialakítása a korábbi tapasztalatokon alapszik,
- tisztán mechanikus alapon néhány lényeges paraméter viselkedésére alapozva,
- regressziós, ahol a függő változók megfigyelt vagy mért leromlási értékei egy vagy több független változóhoz kapcsolódnak,
- mechanikus-empirikus, ahol a szükséges egyenlet definiált, mechanisztikus elveken alapul, a függő változó pedig a tapasztalt leromlással kapcsolatos.

Ennek alapján az eljárásokat két alapvető csoportba sorolhatjuk, determinisztikus és valószínűségi csoportba. A determinisztikus modellben az állapotok előre jelzettek, mint a megfigyelt vagy mért leromlási adatok alapján felállított matematikai függvény pontos értékei. Ebbe az osztályba tartozik néhány megközelítés: mechanisztikus, regressziós, mechanisztikus-empirikus, stb.. A valószínűségi modellekben az állapotokat a lehetséges állapotokat tartalmazó valószínűségi függvény előrejelzése adja.

A valószínűségi függvényeknek két típusát alkalmazzák a valószínűségi eloszlásfüggvényt és a Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrixot. A valószínűségi eloszlásfüggvény folytonos függvény (lásd a 14. ábrát), amely az állapotindex valószínűségét szemlélteti a szerkezet életkorának függvényében. Ezt a fajta függvényt túlélési görbének is nevezik. Ennek a valószínűségi eloszlásfüggvénynek a segítségével meghatározható a leromlási függvény is. A 15. ábrán a vízszintes tengely jelzi az időt, a függőleges tengely pedig a minőséget jellemző állapotot illusztrálja.



14. ábra A leromlás valószínűségi eloszlása



15. ábra Leromlási görbe állapotjellemező beavatkozás esetén

A kezdeti állapot és a hozzá tartozó minőség közel van a skála tetejéhez, ez az érték közel 100% (azaz tökéletes állapot). A minimális elfogadási szintet (ún. beavatkozási határt) számos tényező (pl. a pénzügyi lehetőségek, a beavatkozási politika, biztonság, gazdaságosság) befolyásolja. Az állapotjavító beavatkozás meghosszabbítja a szerkezet élettartamát és annak teljesítő képességét. A leromlási görbe meghatározásához idősoros állapotvizsgálat kell. Ha ez nem áll rendelkezésre, akkor a Markov-féle mátrixot használjuk.

A mátrix létrehozásához a lehetséges állapotokat először diszkrét állapotszintekre (pl. 10%, 20%, 30%, ..., 100%) osztják.

Adottak a valószínűségek minden állapotszint esetében és egy átmeneti valószínűségi mátrixot definiálnak. Ezt a mátrixot alkalmazzák az állapot előrejelzésére meghatározott (pl. 1 vagy 2 éves) időperiódus után. Idősorok megadása nem szükséges. A mátrixot az 5. táblázat mutatja be.

Jelöljük a mátrixot \mathbf{Q} -val. A \mathbf{Q} mátrix q_{ij} eleme az i -edik állapotból a j -edik állapotba történő átmenet valószínűsége. Ez a struktúra feltételezi, hogy a választott időszak eltelte után az állapot vagy változatlan marad, vagy pedig eggyel (esetleg kettővel) alacsonyabb állapotba kerül.

Több módszer ismeretes a mátrix meghatározására. A mátrix elemeinek meghatározásához gyakorlati szakemberek meginterjúvolhatók. A leggyakoribb eljárás az átmeneti valószínűségek meghatározására a lineáris regressziós eljárás, de alkalmaznak Poisson- és negatív binomiális regressziót is. A Poisson-féle regressziós modell elismeri a mérnöki szerkezetek leromlásának Markov-féle jellegét és expliciten kapcsolatot teremt a leromlás és a fő változók között. A negatív binomiális modell a Poisson-modell továbbfejlesztése, amely a függő változók átlaga és szórása között az egyenlőség feltételezését gyengíti.

Jelenlegi állapot	A jövőbeni állapotra vonatkozó valószínűségek									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1:(100%-91%)	0.95	0.03	0.02							
2:(90%-81%)		0.93	0.07							
3:(80%-71%)			0.94	0.04	0.02					
4:(70%-61%)				0.95	0.05					
5:(60%-51%)					0.92	0.05	0.03			
6:(50%-41%)						0.96	0.04			
7:(40%-31%)							0.95	0.04	0.01	
8:(30%-21%)								0.93	0.07	
9:(20%-11%)									0.95	0.05
10:(10%-0%)										1

5. táblázat Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrix

7.2. Optimalizációs modell

A bemutatandó optimalizációs modellben példaként a mérnöki szerkezetek közül a gépkocsik alkatrészeinek leromlását és karbantartását vizsgáljuk [8, 9].

A modellben a következő jelöléseket használjuk:

- Mérnöki szerkezet, azaz a gépkocsik típusa: **tip** ($tip_1, \dots, tip_m, \dots, tip_M$) – például Volvo autóbusz, stb.
 m a futóindex, M a típusok száma.
- Az egyes gépkocsi típusok darabszámát a **db** vektor tartalmazza (db_1, db_2, \dots, db_M).
- Az egyes gépkocsik vizsgálatba bevett különböző alkatrészeinek számát jelölje N . Mivel azonos jellegű szerkezetekről van szó, feltételezhetjük, hogy az alkatrészek száma az egyes típusoknál megegyezik. Itt alkatrészen nyilván nem az elemi alkatrészeket (csavar, szegecs, ...), hanem nagyobb, javítás szempontjából együtt kezelendő egységet értünk (fékberendezés, váltómű, kormánymű, stb.).

Jelölje r_m az m -edik típusú gépkocsi n -edik fajta alkatrészének darabszámát. Ez azt jelenti, hogy ebből az alkatrészből összesen $db_m \cdot r_m$ van.

- Az egyes alkatrészek különböző állapotúak lehetnek. Az állapot leírására több minősítő paraméter vehető figyelembe (például vizuális jellemzés, különböző műszeres állapotvizsgálatok eredménye). Jelöljük a figyelembe vett állapotjellemzők számát S -sel. Az egyes állapotok minősítésére, például, a következő osztályzatok használhatók: hibátlan – 1 osztályzat, rendeltetésszerű működést nem befolyásoló hiba – 2 osztályzat, rendeltetésszerű működést akadályozó hiba – 3 osztályzat, használhatatlan – 4 osztályzat.
- Az állapot megváltozása, az ún. leromlás a gépkocsik típusán kívül egyéb tényezőktől, – például, futásteljesítmény, szállított mennyiség – is függ. Jelölje ezek különböző értékeinek számát F , a megfelelő futóindex pedig legyen f .
- A lehetséges állapotjavító beavatkozási típusokat \mathbf{p} ($p_1, \dots, p_k, \dots, p_K$) vektor jelöli – k a futóindex, K a lehetséges karbantartási, beavatkozási műveletek száma. A beavatkozás az alkatrész típusától függően lehet, például, egyszerű javítás, kisebb részegység cseréje, fődarab cseréje vagy alkatrészcsere.
- Többperiódusú algoritmus esetén t az év indexe, T az évek száma

A feladatban alkalmazott vektorok, illetve mátrixok mérete attól függ, hogy az adott mérnöki szerkezet esetében hány minősítő paramétert veszünk figyelembe, s ezek hány különböző értéket vehetnek fel. Abban az esetben, ha a minősítő paraméterek száma S , és ezek mindegyike 4 különböző értéket, 4 osztályzatot vehet fel (pl. 1 jelöli a legjobb – 4 a legrosszabb minősítést), akkor a lehetséges állapotok száma S^4 , például $S = 4$ esetén 4^4 , azaz 256. Ez azt jelenti, hogy a feladat megoldásában alkalmazott vektor mérete 256, illetve $256 \cdot 256$ elemű a mátrix. Jelölje a mátrix méretét L .

\mathbf{Z} jelölje azt az ismeretlen vektort, amelynek elemei arányt jelentenek. A vektorok száma a mérnöki szerkezetek (azaz a gépkocsi-alkatrészek) típusainak, a futásteljesítményeknek, a beavatkozásoknak és a vizsgált évek számának szorzatából adódóan $M \cdot N \cdot F \cdot K \cdot T$. A vektor elemeinek száma megegyezik a lehetséges minősítési állapotok számával, azaz L . A \mathbf{Z}_{mnfkt} vektor l -edik eleme az m, n, f, k, t indexekhez tartozó szerkezetek l -edik állapotba eső részére mondja meg, hogy hány százalékukon kell a p_k karbantartást végrehajtani az adott

időszakban. Ezt az elemet a továbbiakban z_{mnfkt}^l , vagy $(\mathbf{Z}_{mnfkt})^l$ jelöli. A vektorok, illetve a mátrixok elemeire történő hivatkozáskor a felső indexet alkalmazzuk.

A Markov-féle átmeneti valószínűségi mátrixot jelölje \mathbf{Q}_{mnfk} , ez a m -edik típusú gépkocsi n -edik alkatrészéhez, a f -edik futásteljesítményhez és a k -edik beavatkozás-típushoz tartozik. A különböző mátrixok száma $M \cdot N \cdot F \cdot K$, a négyzetes mátrix sorainak és oszlopainak száma pedig megegyezik a lehetséges minőségi állapotok számával, azaz L . A \mathbf{Q}_{mnfk} mátrix q_{mnfk}^{il} , vagy $(\mathbf{Q}_{mnfk})^{il}$ -val jelölt i -edik sorának l -edik eleme annak a valószínűségét adja meg, hogy a tervezési időszak elején az i -edik állapotban levő alkatrész az időszak végére az l -edik állapotba kerül.

Jelöljük \mathbf{V}_{mnft} -vel azt az ismeretlen vektort, amely megadja azon mérnöki szerkezetek (gépkocsi-alkatrészek) arányát, amely az m -edik típus n -edik fajta alkatrészéhez, az f -edik futásteljesítményhez tartozik a t -edik periódus végén,

Jelöljük \mathbf{b}_{mnf} -vel azt a vektort, amely az m -edik típus n -edik fajta alkatrészének, az f -edik futásteljesítményhez tartozó különböző állapotainak arányait adja a tervidőszak kezdetén.

Néhány feltételnek teljesülnie kell. Az első feltétel a kezdeti év mérnöki szerkezeteinek (gépkocsitípusok alkatrészeinek) arányaira vonatkozik, a kezdeti állapoteloszlással kapcsolatos:

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{U} \mathbf{Z}_{mnfk1} = \mathbf{b}_{mnf}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad n = 1, 2, \dots, N \quad f = 1, \dots, F, \quad (7.1)$$

ahol \mathbf{U} $L \cdot L$ -es egységmátrix. Olyan \mathbf{Z} vektort kell választanunk az első évben, amely megadja a kiindulási \mathbf{b}_{mnf} vektort, minden gépkocsitípus, minden alkatrészfajta, és minden futásteljesítmény esetén.

A második feltétel az első tervezési év végére határozza meg a szerkezetek, azaz az alkatrészek arányát, az első év végére az \mathbf{V}_{mnf1} vektort határozza meg:

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_{mnfk} \mathbf{Z}_{mnfk1} = \mathbf{V}_{mnf1}, \quad m = 1, \dots, M \quad n = 1, \dots, N \quad f = 1, \dots, F. \quad (7.2)$$

A következő feltétel a közbülső évekre vonatkozik. Ez a feltétel azt jelenti, hogy \mathbf{V}_{mnft} , azaz a t -edik periódus végén kapott arányok a $(t+1)$ -edik periódusra a kezdeti eloszlást szolgáltatják. Minden évben a következő feltételnek kell teljesülnie:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \mathbf{U} \mathbf{Z}_{\text{mnfk}(t+1)} - \mathbf{V}_{\text{mnft}} = \mathbf{0}, \quad f = 1, \dots, F \quad k = 1, \dots, K \quad t = 1, \dots, T-1. \quad (7.3)$$

A (7.3) feltétel definiálja az ismeretlen \mathbf{V}_{mnft} vektort.

Minden évben valamilyen beavatkozást minden szerkezeten végrehajtottunk:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K \mathbf{Z}_{\text{mnfkt}} = \mathbf{1}, \quad t = 1, \dots, T. \quad (7.4)$$

A gépkocsialkatrészeket 3 csoportba sorolhatjuk: megfelelő (jó), nem elfogadható (rossz) és a maradék. Jelöljük G -vel a jó, R -rel a rossz és E -vel a többi szerkezet halmazát. H pedig jelölje a teljes halmazt. Ekkor a halmazokra a következő relációk teljesülnek:

$$\begin{aligned} G \cap R &= \emptyset & G \cap E &= \emptyset \\ R \cap E &= \emptyset \\ G \cup R \cup E &= H \end{aligned} \quad (7.5)$$

A kezdeti évre vonatkozóan ezekre a halmazokra a következő feltételeket írhatjuk fel:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{\text{mnfk}} \mathbf{Z}_{\text{mnfk1}})^l &\geq \alpha_1 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F (\mathbf{b}_{\text{mnf}})^l, \quad l \in G \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{\text{mnfk}} \mathbf{Z}_{\text{mnfk1}})^l &\leq \alpha_2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F (\mathbf{b}_{\text{mnf}})^l, \quad l \in R, \\ (\underline{\mathbf{b}}_E)^l &\leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{\text{mnfk}} \mathbf{Z}_{\text{mnfk1}})^l \leq (\bar{\mathbf{b}}_E)^l, \quad l \in E \end{aligned} \quad (7.6)$$

ahol

- G, R, E az előbb megadott halmazok,
- $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F (\mathbf{b}_{\text{mnf}})^l, \quad l \in G$ a tervezési periódus előtt a jó halmazban lévő szerkezetek részaránya,
- $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{\text{mnfk}} \mathbf{Z}_{\text{mnfk1}})^l, \quad l \in G$ a jó halmazba eső szerkezetek részaránya az első év után,

- $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F (\mathbf{b}_{mnf})^l$, $l \in R$ a tervezési periódus előtt a rossz halmazban lévő szerkezetek részaránya,
- $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{mnfk} \mathbf{Z}_{mnfk1})^l$, $l \in R$ a rossz halmazba eső szerkezetek részaránya az első év után,
- $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{mnfk} \mathbf{Z}_{mnfk1})^l$, $l \in E$ az egyéb halmazba eső szerkezetek részaránya az első év után,
- $\underline{\mathbf{b}}_E$ az egyéb halmazba eső szerkezetek részarányára alsó határ vektor,
- $\overline{\mathbf{b}}_E$ az egyéb halmazba eső szerkezetek részarányára felső határ vektor,
- α_1 és α_2 adott állandók.

Az első feltétel azt jelenti, hogy a „Jó” halmazba eső gépkocsialkatrészek mennyisége az első év után egy adott értéknél nagyobb, vagy legalábbis azzal egyenlő kell, hogy legyen, ez jelen esetben a kiinduló mennyiséggel arányos, annak valahányad része. A második feltétel nem engedi meg, hogy a „Rossz” halmazba az első év eltelte után a gépkocsi-alkatrészeknek nagyobb aránya essék, mint a tervezési periódus elején levő érték egy bizonyos százaléka. A harmadik feltétel alsó és felső korlátot ad a maradék alkatrészekre az első év eltelte után.

A további évekre hasonló egyenlőtlenségeket írhatunk fel:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \mathbf{Y}_{ijt} \mathbf{R} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \mathbf{Y}_{ij(t+1)}, \quad t = 1, 2, \dots, T-1, \quad (7.7)$$

Ahol \mathbf{R} a $<, >, =, \leq, \geq$ reláció valamelyikét jelöli, és ezek az összefüggések megadhatók tetszőleges állapot esetén. Az egyes sorokban eltérő relációjelek állhatnak.

A (7.6) és (7.7) feltételi egyenlőtlenségek helyett írhatunk fel feltételeket a végállapotokra is (azaz $t = T$ esetre) is:

$$\begin{aligned}
\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{mnfk} \mathbf{Z}_{mnfkT})^l &\geq \alpha_1 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\mathbf{b}_{mnf})^l, \quad l \in G \\
\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{mnfk} \mathbf{Z}_{mnfkT})^l &\geq \alpha_2 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\mathbf{b}_{mnf})^l, \quad l \in R \\
(\mathbf{b}_E)^l &\leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\mathbf{Q}_{mnfk} \mathbf{Z}_{mnfkT})^l \leq (\bar{\mathbf{b}}_E)^l, \quad l \in E
\end{aligned} \tag{7.8}$$

Az állapotokra vonatkozó feltételek mellett minden karbantartási feladatnál fontos szerepet játszik a költségtényező. Lehetőleg olyan karbantartási stratégiát kell kidolgozni, amely teljesíti az állapotokra előírt feltételeket és lehetőleg a legalacsonyabb költségű.

Jelölje \mathbf{C}_{mnfk} a beavatkozási egységköltségek vektorát, azaz azt a vektort, amelyik az m -edik típusú gépkocsi, n -edik fajta alkatrészének f -edik kihasználtsági foka esetén a k -edik beavatkozáshoz tartozik. A vektor elemei azt adják meg, hogy az egyes minősítési állapotok esetén a karbantartási tevékenységből egységnyi mennyiség elvégzése milyen költségű.

Több különböző feltételt is megfogalmazhatunk a költségekkel kapcsolatban. Ezek egyike azzal kapcsolatos, ha az egyes tevékenységekhez évenként költségkorlátot írunk elő:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F r^{(t-1)} \mathbf{C}_{mnfk} \mathbf{Z}_{mnfkt} = r^{(t-1)} M_k, \quad t = 1, \dots, T \quad k = 1, \dots, K, \tag{7.9}$$

ahol r a kamatláb, \mathbf{C}_{mnfk} a k -edik beavatkozáshoz, m -edik gépkocsitípus n -edik alkatrészéhez, f -edik futásteljesítményhez tartozó egységköltség vektor és M_k a k -edik beavatkozáshoz az adott évben rendelkezésre álló összeg.

Ezután a célfüggvény a következőképpen fogalmazható meg: a teljes beavatkozási költségek minimalizálása,

$$C = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \mathbf{Z}_{mnfkt} \mathbf{C}_{mnfk} \rightarrow MIN ! \tag{7.10}$$

Ha az évente rendelkezésre álló B összeg is adott, akkor további két feltétel megfogalmazható a költségkorlátokkal kapcsolatban.

A kezdeti évre vonatkozó költségkorlát feltétel:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K \mathbf{Z}_{mnfk1} \mathbf{C}_{mnfk} \leq B. \tag{7.11}$$

A további $t = 2, 3, \dots, T$ évekre a feltétel a következőképpen alakul:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K r^{(t-1)} \mathbf{Z}_{mnfkt} \mathbf{C}_{mnfk} \leq r^{(t-1)} \mathbf{B} . \quad (7.12)$$

A karbantartási költségek minimalizálása mellett a felhasználói költségek minimalizálása is lehet feladatunk célja. A felhasználói költségek függenek a gépkocsi típusától, az alkatrésztől és a futásteljesítménytől. Ezt a felhasználói költségvektort \mathbf{K}_{mnf} -vel jelöljük. A vektor l -edik koordinátája az l -edik minősítési állapothoz tartozik. ($1 \leq l \leq L$, ami a példánkban 256).

A felhasználói költségek minimalizálásának célfüggvénye a következő:

$$C = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \mathbf{V}_{mnft} \mathbf{K}_{mnf} \rightarrow MIN ! \quad (7.13)$$

Gyakran célszerű a kétféle költséget bizonyos mértékig együtt kezelni, és kombinált célfüggvényt felírni. Ezt a következőképpen tehetjük meg:

$$C = \alpha \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \mathbf{Z}_{mnfkt} \mathbf{C}_{mnfk} + \beta \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \mathbf{V}_{mnft} \mathbf{K}_{mnf} \rightarrow MIN \quad (7.14)$$

Itt $\alpha = 0$ esetén csak a felhasználói költségeket, $\beta = 0$ esetén pedig csak a karbantartási költségeket optimalizáljuk. A két paraméter különböző súlyozásával így tetszés szerinti célfüggvény értékeket határozhatunk meg.

8. Következtetések, javaslatok

Az általam kifejlesztett, a forgalmi változásokat is figyelembe vevő útburkolat-gazdálkodási modell kiküszöböli a korábbi modellek hiányosságait. A forgalom – elsősorban a nehézgépjármű forgalom – megváltozásának figyelembevételével az útfenntartási költségek tervezésére pontosabb eredményt szolgáltat. Ezért a korábbiaknál hatékonyabb gazdálkodást tesz lehetővé. Pontosabban meghatározza a javítási igényeket és ezek költségeit. Az időszakos állapot-felvételi adatok algoritmusba történő beépítésével figyelembe vehetjük az időjárási anomáliák hatását, ezáltal a fenntartás tervezése még pontosabbá válhat.

Az elkészített matematikai modell hálózati szintű megoldást ad. Megadja azt, hogy az egyes burkolatfajták esetén, adott forgalmi szint, adott állapotparaméter esetén a szakaszok hány százalékán kell az egyes beavatkozásokat elvégezni ahhoz, hogy a vizsgált időszak végére a szakaszok az előírt minőségi szintet tartsák. Meghatározza az ehhez szükséges minimális forrásigényt. A számítási eredmények azonban alkalmazhatók a másik két szint (a projekt szint, illetve a munka szint) esetére is. A hálózati eredményt, azt, hogy az adott útburkolattípus, forgalmi kategória és útburkolat minőségi szint esetén a szakaszok hány százalékán kell az adott beavatkozást elvégezni, le kell bontanunk az egyes konkrét útszakaszokra. Amennyiben megfelelő út-adatbázis áll rendelkezésünkre, ebből pontosan meg tudjuk határozni, hogy az egyes megyei útkezelőkhöz mekkora útszakasz tartozik, és ebből mennyi esik a különböző kategóriákba (forgalom, burkolattípus, minőség). A matematikai modellel kiszámított költségigényt leoszthatjuk az egyes útkezelők között – itt elsősorban az útszakaszok területét, másodsorban a minőségi állapotot kell figyelembe venni. A hálózat egészére vonatkozó adatok figyelembevételével meghatározhatjuk az egyes megyei útkezelőknél, hogy az általuk kezelt hálózaton milyen arányban kell az egyes burkolatjavító beavatkozásokat elvégezni. Ennek alapján megszülethet a döntés, hogy a tényleges beavatkozásokat az adott időszakban mely szakaszokon végzik el. Majd a rendelkezésre álló kapacitások (anyagi és pénzügyi) figyelembevételével megtörténhet a munkák tényleges megtervezése az adott időszakban. Elsősorban kapacitáshiány esetén, a matematikai modell helyett gyakran célszerűbb a rangsoroló eljárás használata, ahol az új algoritmus ugyancsak figyelembe veszi mind a forgalmi változásokat, mind az időszakos állapotfelvétel eredményét.

A burkolat-gazdálkodásnál kifejlesztett algoritmust általánosítottam olyan mérnöki szerkezetek esetére, amelyeknél a leromlási függvény a burkolatgazdálkodáshoz hasonlóan fogalmazható meg. Az alkalmazás feltétele, hogy több olyan szerkezetet vizsgáljunk, amely

nagyszámú alkatrészt tartalmaz, s az alkatrészek leromlása a kihasználtsági foktól függ. A dolgozatban a modellt gépkocsi-alkatrészek esetére vezettem le – célszerű lenne a jövőben megvizsgálni, milyen további körben alkalmazható még.

A továbbiakban néhány továbbfejlesztési lehetőséget említék meg.

1. A rendelkezésre álló adatok pontatlansága és az esetleges állapot-felvételi hibák miatt célszerűnek látszik sztochasztikus modell alkalmazása. Itt akár a költségek, akár a technológiai mátrix elemei is lehetnek valószínűségi változók. Érdekes sztochasztikus programozási modellt javasol Prékopa András, melyet még nem publikált változatban, személyesen ismerttettem. A modell alapelveit a disszertáció első részében ismerttettem. A lényeg az, hogy annak valószínűségét írjuk elő, hogy az adott szintű útszakaszok összterülete nagy valószínűséggel ne csökkenjen. Emellett törekszünk a beavatkozási költségek minimalizálására.

Ez a sztochasztikus programozási modell több szempontból is rugalmasan alakítható:

- ha például a modellt egyetlen útszoporra kívánjuk alkalmazni, vagy az egyes útszoportokra külön-külön, akkor a modellben az i indextől kell csupán eltekinteni,
 - több időperiódust átölelő optimalizálási modell is könnyen megfogalmazható lenne, ehhez segítséget jelent a fenti egy időperiódusos modellben a t idő index alkalmazása, melynek az egy időperiódusos modellben nincs is igazi jelentősége.
2. Modern adatbázis-technika alkalmazása, amely felhasználja a negyedik generációs nyelvek előnyeit. Ide tartozik többek között a hálózatos alkalmazások megvalósítása, a redundancia kiküszöbölése. Az adatbázisban a célszerű GIS technika alkalmazása, továbbá javasolt a GIS és a PMS összekapcsolása. Győr város közlekedési hálózatának megvalósításakor már adatbázisunkban tároltuk az egyes csomópontok koordinátáit. Rendelkezésünkre áll a térkép, a rossz anyagi körülmények miatt az adatok ellenőrzése és további felhasználása elmaradt. Pedig ezekben a rendszerekben a különböző közművek, telkek, utak, az egyes objektumok különböző rétegeken helyezkednek el, így többféle feldolgozásra adnak lehetőséget.
 3. Hálózat megvalósító eljárás megvalósítása

Adott egy közlekedési hálózat. A megnövekedett igények miatt kapacitásbővítés szükséges, illetve új éleket akarunk elhelyezni a hálózaton. Ez NP teljes probléma, ezért olyan hatékony heurisztikus technikákat kell kialakítani, amelyek alkalmasak a feladat

megoldására. Egy egyszerű, de jól kezelhető modellt ír le Bakó [30], ahol a heurisztikus modellt egy pontos, matematikailag korrekt optimalizációs módszert felhasználva oldja meg.

4. A mérnöki-műszaki rendszerek esetében a fenntartási stratégia és technológia nagyban függ a rendszer saját paramétereitől, illetve a terhelés és külső környezet aktuális hatásaitól. Különösen igaz ez olyan létesítményekre, melyek élettartama több évtized. Ilyen hosszú időtávon nagyon nehezen jelezhetők előre a rendszer paramétereit, még nehezebb feladat a tényleges terhelés idősorának előre jelzése. Mind a forgalmi, mind pl. az időjárás viszonyok olyan mértékben változhatnak, melyek stratégiai és operatív szinten is új fenntartási technológiák bevezetését indokolhatják. A hagyományos valószínűség számítási modellek és idősor elemzés módszertana azért nem mindig alkalmazható a probléma megoldására, mert ezek inkább véletlen tömegjelenségek vizsgálatára alkalmasak, egy adott műszaki létesítmény esetén azonban számos „szubjektív”, egyszeri, a historikus adatsorból nem becsülhető esemény következhet be egy több évtizedes időhorizonton. Ezért ezen bizonytalanságok vizsgálatára a valószínűség elmélet (probability theory) helyett a lehetőség elmélet (possibility theory) lehet alkalmas. A lehetőség elméletre épülő fuzzy módszertan mind a logikai, mind a numerikus változók fuzzy általánosításával, a fuzzy szám és a fuzzy logikai változó bevezetésével hatékonyan tudja támogatni a különböző típusú bizonytalanságokkal terhelt döntési problémákat, és kimutathatóan jobb, a valós élethez igazodó optimum keresést tesz lehetővé. Célszerűnek látszik továbbá a genetikusan algoritmusok alkalmazása.

Irodalomjegyzék

- [1] Abaza, K. A.: *Optimum Flexible Life-Cycle Analysis Model*
Journal of Transportation Engineering 11 (2002), 542-549.
- [2] Abaza, K. A., Ashur, S. A., Al-Khalib, I. A.: *Integrated Pavement Management System with a Markovian Prediction Model*
Journal of Transportation Engineering 1 (2004), 24-33.
- [3] Abaza, K. A.: *Iterative Linear Approach for Nonlinear Nonhomogenous Stochastic Pavement Management Models*
Journal of Transportation Engineering 3 (2006), 244-255.
- [4] Ambrusné, S. K.: *Autópálya PMS modell*
Kutatási témajelentés, KHG-UKIG Budapest (1996), 22.
- [5] Ambrusné, S. K.: *Autópálya adatbázis kialakítása*
Kutatási témajelentés, KHG-UKIG Budapest (1998), 116.
- [6] Ambrusné, S. K.: *Autópálya PMS programrendszer tervezése és megvalósítása*
Könyvípári Műszaki Főiskola Tudományos Közlemények, Budapest (1999), 5-18.
- [7] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A., Horváth, Z.: *Development a Motorway Pavement Management System*
Proceedings of 1st European PMS Conference, Budapest (2000), CD publishing12.
- [8] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A.: *Maintenance and Rehabilitation Systems of Infrastructures Management*
Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 2 No. 2. (2005), 91-102.
- [9] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A.: *An Optimization Model for Maintenance of Engineering Structures*
Proceedings of 3rd IEEE Conference, Mauritius (2005), 265-269.
- [10] Ambrusné, S. K.: *Győr Megyei Jogú Város Út adatbázis – dokumentáció*
Kutatási témajelentés, UNIVERSITAS Győr Kht. (2005), 80.
- [11] Ambrusné, S. K.: *Több célra alkalmazható városi adatbank és alkalmazása az útburkolat gazdálkodásban*
Acta Agraria Kaposváriensis, Vol. 10 No. 3. (2006), 47-59.

- [12] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A., Gyulai, A., Vízi, N.: *Multipurpose City Data Bank*
 Proceedings of the 9th International Road Conference, Roads for Sustainable
 Development, Budapest (2006), Cd publishing 7.
- [13] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A., Tóth, L.: *Road Management With Traffic Forecasting
 And Assignment*
 Proceedings of the 9th International Road Conference, Roads for Sustainable
 Development, Budapest (2006), Cd publishing 6.
- [14] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A., Tóth, L.: *Traffic Dependent Pavement Management
 Algorithm*
 Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Cybernetics, Tallinn,
 Estonia (2006), 231-235.
- [15] Ambrus-Somogyi, K.: *Combined Management Algorithm for Maintenance of Road
 System*
 Pollack Periodica, Vol. 2 No. 3. (2007), 15-23.
- [16] Ambrus-Somogyi, K.: *Deterioration-based Maintenance Management Algorithm*
 Acta Polytechnica Hungarica –Vol. 4 No.1. (2007), 119-126.
- [17] Ambrus-Somogyi, K.: *Deterioration-based Maintenance Management Algorithm*
 Proceedings of SAMI - 5th Slovakian-Hungarian Joint Symposium on Applied
 Machine Intelligence and Informatics, Poprad, Slovakia (2007), 515-523.
- [18] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A., Hartványi, T.: *An Optimal Quality Management
 Algorithm for Road Maintenance*
 Proceedings of INES - 12th International Conference on Intelligent Engineering
 Systems, Miami, Florida (2008), 233-236.
- [19] Ambrus-Somogyi, K.: *A New Pavement Model with Traffic Change*
 Proceedings of I. International Interdisciplinary Technical Conference of Young
 Scientists, Poznan, Poland (2008), 186-190.
- [20] Ambrus-Somogyi, K., Bakó, A., Hartványi, T., Szűts, I.: *Traffic Dependent Markov
 Type Multiperiod Pms Model*
 Proceedings of EPAM3 2008 - 3rd European Conference on Pavement and Asset
 Management, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 7.

- [21] Bakó, A.: *Minimális és multiterminális minimális út feladat megoldása veszteséges hálózatban*
Egyetemi doktori disszertáció, ELTE TTK, Budapest (1971)
- [22] Bakó, A.: *Multiterminális minimális út feladat megoldási módszerei és alkalmazásai*
MTA SZTAKI Közlemények 6 (1971), 49-54.
- [23] Bakó, A.: *Forgalom szétosztás és elosztás tervezési modelljeinek matematikai és számítástechnikai értékelése és fejlesztése*
Kandidátusi értekezés, Budapest (1980), 230.
- [24] Bakó, A.: *Heuristic and Optimization Models for Solving the PMS*
Proceedings of the PMS, Budapest (1989), 57-67.
- [25] Bakó, A., Boromissza, T., Gärtner, L.: *Úttervezési és fenntartási modell(HDM-III)*
KTE Munkabizottsági jelentés, Budapest (1989), 79.
- [26] Bakó, A.: *Az első hazai hálózati szintű PMS matematikai modellje*
Közlekedésepítési és Mélyépítéstudományi Szemle 17 (1991), 68-72.
- [27] Bakó, A., Csicselyné, T. M., Gáspár, L.: *Optimális városi PMS megoldása*
Városi Közlekedés 3 (1994), 155-160.
- [28] Bakó, A., Szántai T.: *A magyar PMS optimalizációs modelljének kialakítása, a HUPMS modell*
Közlekedésepítési és Mélyépítéstudományi Szemle 3 (1997), 108-111.
- [29] Bakó, A., Csicselyné, T. M., Gáspár, L., Szakos, P.: *Autópálya PMS modell*
Közúti Közlekedés- és Mélyépítéstudományi Szemle 2 (1998), 41-45.
- [30] Bakó, A., Hartványi, T., Szüts, I.: *Transportation Network Realization with an Optimization Method*
Proceedings of 4th International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Cairo, Egypt (2009), 75-79.
- [31] Bellman, R.: *On a routing problem*
Quarterly of Applied Mathematics 16 (1958), 87-90.
- [32] Bevis, H. W.: *Forecasting zonal traffic volumens*
Traffic Quarterly (1956), 207-222.

- [33] Bham, G. H., Gharaibeh, N. G., Darter, M. I. (2001). *Development of GIS-Based Illinois Highway Pavement Management System*
ESRI User Conference, San Diego, California. (2001)
- [34] Brilllet, F., Lepert, Ph.: *Development of a Technico.Economic Optimization Model for Pavement Maintenance Works*
Proceedings of EPAM3, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 7.
- [35] Bureau of PublicRoads: *Traffic Assignment Manual Urban Planning Division*
US Departement of Commerce, Washington D.C: (1964)
- [36] Chen, a., Jayakrishnan, R., Tsai, W. K.: *Faster Frank.Wolfe Traffic Assigment with New Flow Update Scheme*
Journal of Transportatation Engineering 1 (2002), 31-39.
- [37] Csorba, A., Misztina, T.: *Ok-okozat követő, pályaszerkezet megóvó sorrendű beavatkozások tervezése*
Felhasználói leírás, Szolnoki Közúti Igazgatóság (1989), 32.
- [38] Dijkstra, E. W.: *A note on two problems in connection with graphs*
Numerische Mathematik 1 (1959), 269-271.
- [39] Dreyfus, S. E.: *An appraisal of some shortest algorithms*
Operations Research 17 (1969), 395-412.
- [40] Durango-Kohen, P. L., Tadepalli, N.: *Using Advanced Inspection Technologies to Suppoer Investments in Maintenance and Repair of Transportation Infrastructure facilities*
Journal of Transportatation Engineering 1 (2006), 60-68.
- [41] Edmonds, J., Karp, R. M.: *Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems*
Journal of Association for Computing Machinery 19 (1972), 248-264.
- [42] Evans, A. W.: *Some properties of trip distribution methods*
Transportation Research 4 (1970), 19-36.
- [43] Floyd, J. R.: *Algorithm 97, Shortest path*
Communication of Association for Computing Machinery 5 (1962), 345.

- [44] Ford, L. R.: *Network flow theory*
The RAND Corporation Paper P-923 (1956)
- [45] Fratar, T. J.: *Vehicular trip distribution by successive approximation"*
Traffic Quarterly (1954), 53-65.
- [46] Gáspár, L.: *Az első hazai hálózati szintű PMS kifejlesztése*
Közlekedéscépzítési és Mélyépítéstudományi Szemle 22 (1991), 131-141.
- [47] Gáspár, L.: *Útgazdálkodás*
Akadémiai Kiadó, Budapest (2003), 361.
- [48] Gáspár, L., Horváth, F.: *Fenntartási módszerek*
Széchenyi István Egyetem (2003), 1-128.
- [49] Gáspár, L.: *The utilisation of pavement performance data in Hungarian road management*
Proceedings of International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Athen (2007), 1699-1707.
- [50] Gáspár, L.: *Factor influencing the reliability of pavement performance models*
Proceedings of EPAM3 2008 - 3rd European Conference on Pavement and Asset Management, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 10.
- [51] Gáspár, L.: *Development of the Hungarian highway asset management*
Proceedings of EPAM3 2008 - 3rd European Conference on Pavement and Asset Management, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 10.
- [52] Gáspár, L.: *Asset management; implementation of management systems. Synthesys paper*
Proceedings of EPAM3 2008 - 3rd European Conference on Pavement and Asset Management, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 9.
- [53] Gáspár, L. et al.: *COST Action 354 Performance Indicators for Road Pavements, The way forward for pavement performance indicators across Europe*
Final report, Vienna, Austria (2008), 68.
- [54] Golden, B.: *Shortest-path algorithms: A comparison*
Operations Research 24 (1976), 1164-1168.

- [55] Haas R., Hudson W. R., Zaniewski J. P.: *Modern Pavement Management*
Krieger P. C., Malabar, Florida , (1994), 291.
- [56] Hans, Z. N., Smadi, O. G., Maze, T. H., Souleyrette, R. R., Resler, J. L.: *Iowa 's Pavement Management Program Database: Issues and Design Considerations*
Maintenance Management, Eight AASHTO/TRB, Saratoga Springs, New York (1997)
- [57] Heller, S.: *Pavement Management System on the Strategic and Operative level*
Proceedings of EPAM3, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 7.
- [58] Horváth, B.: *Tömegközlekedési ráterhelési modellek értékelő elemzése és fejlesztése*
PhD értekezés, BME, Közlekedésmérnöki Kar (2005)
- [59] Horváth, B.: *A new public transport assignment model*
Acta Technica Jaurinensis 1 (2008), 93-108.
- [60] Horváth, B.: *Assessment analysis and development of public transport assignment models*
Proceedings of Transport Research Arena Europe 2008, Ljubljana (2008).
- [61] Horváth, B.: *Tömegközlekedési ráterhelési modellek értékelő elemzése és fejlesztése*
Közúti és Mélyépítési Szemle 8 (2008).
- [62] Hudson W. R., Haas R., Uddin W.: *Infrastructure Management*
Mc Giraw-Hill P. C., (1997), 393.
- [63] Kalaba, R.: *On Some Communication Network Problems, Combinatorial Analysis*
Proceedings of Symp. Applied Math. 10 (1960), 261-280.
- [64] Koller, S.: *Forgalomtechnika*
Tankönyvkiadó, Budapest (1976), 254.
- [65] Koren, Cs.: *Célforgalmi mátrixok előállítás a keresztmetszeti számlálás alapján*
Városi közlekedés 2 (1983), 86-89.
- [66] Koren, Cs.: *A közlekedéstervezés néhány megközelítése*
Városi közlekedés 1 (1997).
- [67] Koren, Cs., Prileszky, I., Horváth, B., Tóth-Szabó, Zs.: *Közlekedéstervezés*
Universitas-Győr Nonprofit Kft. Győr (2007), 181.

- [68] Marton, L.: *A forgalomelosztás számítástechnikai modelljeinek vizsgálata és fejlesztése*
PhD értekezés, BME, Közlekedésmérnöki Kar (1998) 96.
- [69] Minty, G. J.: *A comment on the shortest route problem*
Operations Research 5 (1957), 724-728.
- [70] Monigl, J.: *Városi forgalom szétsztási modellek kialakítása*
KÖTUKI (1976)
- [71] Nunoo, Ch., Mrawira, D.: *Shuffled Complex Evolution Algorithms in Infrastructure Works programming*
Journal of Transportation Engineering 7 (2004), 257-266.
- [72] Pollack, M., Wiebenson, W.: *Solution of the shortest route problem – A review*
Operations Research 8 (1960), 224-230.
- [73] Prékopa, A.: *Valószínűségszámítás*
Műszaki Könyvkiadó (1956), 440.
- [74] Prileszky, I., Horváth, B.: *Aprófalvas települési szerkezettel bíró térségek közforgalmú közlekedési kiszolgálására alkalmazható modellek kifejlesztése Baranya megye példáján*
Kutatási jelentés (2008).
- [75] Prileszky, I., Hardi, T., Horváth, B., Winkler, Á., Farkas, I.: *Mosonmagyaróvár és kistérsége közösségi közlekedésének felülvizsgálata és innovatív jellegű, egységes szemléletű korszerűsítése a gazdasági hatékonyság és a szolgáltatási színvonal javítása érdekében*
Kutatási jelentés (2008).
- [76] Prileszky, I., Fülöp, G., Horváth, B., Horváth, G., Farkas, I., Winkler, Á.: *Székesfehérvár város helyi tömegközlekedési szolgáltatásának javítása komplex hatékonysági kritériumok alapján*
Kutatási jelentés (2008).
- [77] Prileszky, I., Fülöp, G., Horváth, B., Horváth, G., Farkas, I., Winkler, Á.: *Dunaújváros helyi tömegközlekedési szolgáltatásának fejlesztése komplex hatékonysági kritériumok alapján*

- Kutatási jelentés (2009).
- [78] Simon, I.: *Engineering Structures Management System: Example on a French Highway Network*
Proceedings of EPAM3 2008, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 9.
- [79] Szántai, T.: *Hálózati szintű PMS modell számítógépes programja*
Programdokumentáció (1990), 1-32.
- [80] Vliet, D. V.: *Improved shortest path algorithm for transport networks*
Transportation Research 10 (1978), 7-20.
- [81] Wang, K. C. P., Zaniewski, J. P., Way, G., Delton, J.: *Revision for the Arizona Department of Transportation Pavement Management System*
Transportation Research Board 72th Annual Meeting (1993), 1-17.
- [82] Wardrop, J. G.: *Some theoretical aspects of road traffic research*
Proceedings Institute of Civil Engineering 36 (1952), 325-378.
- [83] Warshall, S.: *A theorem of Boolean matrices*
Journal of Association for Computing Machinery 9 (1962), 11–12.
- [84] Weninger-Vycudil, A., Samek, G., Rohringer, T.: *Section Based Probabilistic performance Prediction Fiction or Future?*
Proceedings of EPAM3, Coimbra, Portugal (2008), CD publishing 10.
- [85] Ziliakopoulos, A. K., Waller, S. T., Li, Y., Byram, M.: *Large-Scale Dynamic Traffic Assignment: Implementation Issues and Computational Analysis*
Journal of Transportation Engineering 9 (2004), 585-593.