



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék**

TDK DOLGOZAT

**Vasúti késések, valamint vonali és időjárási
jellemzők közötti összefüggések feltárása**

Készítette:

Bánsághi Benedek

Konzulens:

Dr. Földes Dávid

Budapest, 2023. november 2.

Tartalom

1. Bevezetés	1
2. Téma aktualitás, lehatárolás	2
3. Irodalomkutatás	4
4. Helyzetelemzés	9
4.1. Késést befolyásoló tényezők azonosítása	9
4.2. Késés mértéke a magyar hálózaton	11
5. Eredmények és értékelés	14
5.1. Adatelemzés – országos vasúthálózat	14
5.2. Késést becslő módszer	19
5.3. Esettanulmány - becslési módszer alkalmazhatósága	26
6. Konklúzió	28
Ábrajegyzék	29
Táblázatok jegyzéke	30
Irodalomjegyzék	31
Tudományos irodalmak	31
Egyéb irodalmak	32

1. Bevezetés

A vasúti közlekedés a tömeges utazás – mind utasszállítás, mind áruszállítás terén – egyik alappillére, ezért kiemelkedően fontos a vonatok pontos és zavartalan közlekedése. Azonban a vasúti közlekedés kihívásokkal is szembesül. A kötött pálya, a különböző mechanikai és menetdinamikai tényezők bizonyos esetekben erős korlátokat jelentenek. Ebből fakadóan az egyik leggyakoribb és legzavaróbb probléma a vonatok késése. A vonatok késései az utasok számára kényelmetlenséget és idővesztést jelentenek, amelyek negatívan befolyásolják a mindennapi életet és tevékenységeket. Emellett az áruszállítás terén a vállalatok és a gazdaság is érezhető hatásokat tapasztalhatnak a késések következtében. A logisztikai folyamatok megszakadnak, a termelékenység csökken.

A vasúti késések okai számos tényezőre vezethetők vissza. A vonali és időjárási jellemzők mind befolyásolhatják a vonatok menetrendszerű közlekedését. Vonali jellemzők lehetnek a vasúti pálya állapota, az infrastruktúra karbantartása és az előre nem látható technikai hibák. Emellett az erős szél, eső, havazás, hőhullámok vagy akár áradások mind olyan időjárási körülmények, amelyek kedvezőtlen hatással lehetnek a vasúti közlekedésre.

Az összefüggések feltárása a vasúti késések, valamint a vonali és időjárási jellemzők között szükséges a probléma megértése és a megfelelő beavatkozás kiválasztása érdekében. Az ilyen összefüggések felderítése lehetővé teszi a közlekedési szolgáltatók számára, hogy jobban megtervezhessék és kezelhessék a vasúti forgalmat, valamint hatékonyabb intézkedéseket hozhassanak a késések minimalizálása érdekében.

A kutatás alapkérdése, hogy a vasúti késések, valamint a vonali és időjárási jellemzők között milyen kapcsolatok állíthatók fel, ezek hogyan jelennek meg és milyen hatással járnak a vasúti közlekedésben. Jelen kutatás célja, hogy átfogó képet nyújtson a vasúti késések és a vonali, valamint időjárási jellemzők közötti összefüggésekről. További cél, a kapcsolat felállítása a késési tényezők és a késés mértéke között, ami a késés mértékének becsléséhez járulhat hozzá. Az adatok elemzése alapján becsülhetővé válik, hogy egyes késési okok megjelenése milyen hatással fog járni a vonatok közlekedésére. Az elemzéshez valós adatokat használtam, az adatbázis a MÁV 2022 évben közlekedett vonatok adatait tartalmazza. Megjelennek vonatonként a késések mértékei és annak okai.

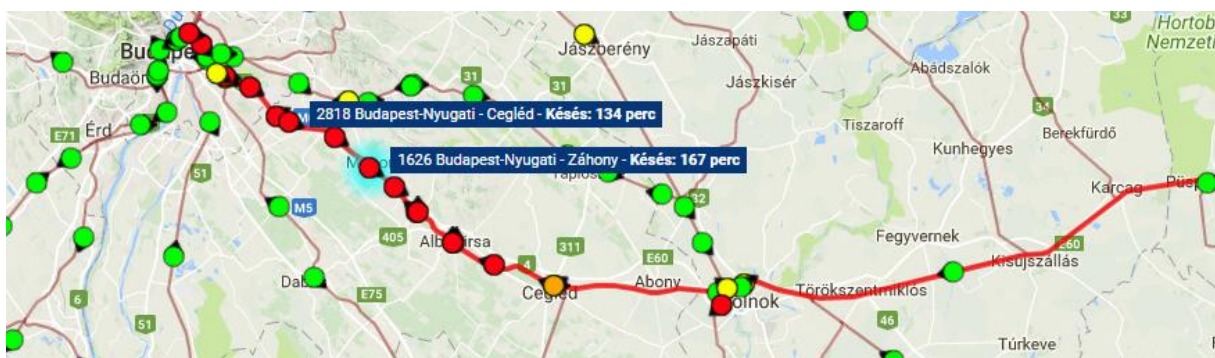
A tanulmány hozzájárulhat a vasúti közlekedés megbízhatóságának és hatékonyságának növeléséhez, valamint az utazási élményének javításához.

2. Téma aktualitás, lehatárolás

A vasúti késések és a vonali, valamint időjárási jellemzők közötti összefüggések vizsgálata kiemelkedően aktuális téma. Az infrastruktúra modernizációja és az utasforgalom növekedése ellenére a vasúti késések problémája továbbra is fennáll, és komoly hatással van mind az utasok, mind a gazdaság szempontjából. Az ilyen jellegű kutatások segíthetnek a probléma gyökerének azonosításában és megoldásának kidolgozásában.

A vasúti közlekedés biztonságának és fenntarthatóságának – mind környezeti, mind gazdasági szempontból – növelése a 21. század egyik leggyakrabban napirenden szereplő célkitűzése az európai vasúti jövőkép fejlesztései kapcsán [1]. A fenntarthatósági célok között szerepelnek időjárási jellemzők és infrastruktúra fejlesztési tényezők.

Emellett fontos elérni azt is, hogy az utazóközönség számára vonzó maradjon a vasúti közlekedés. A vasúti közlekedés megbízhatósága és hatékonysága fontos szempont a modern társadalomban. Az utazók a vasúti hálózatot választják a közlekedéshez, mert gyors, kényelmes és környezetbarát lehetőséget nyújt. Azonban a késések csökkenthetik a vasúti közlekedés vonzerejét, és az utasokat más alternatívák felé terelhetik, ami jelentős gazdasági következményekkel járhat. A vasútról alkotott kép sok esetben negatív, ami főként a késés (1. ábra), illetve a járművek állapota befolyásol. Számos szakmai cikk foglalkozik a késés témájával, kiemelve az extrémumokat: évente 3-4 évet [14][15], napi 250 órát késnek a vonatok [16].



1. ábra: Késő vonatok a 100-as vasútvonalon

(forrás: <http://vonatinfo.mav-start.hu/>)

A kutatásom során lehatárolásokkal éltem:

A vonali és időjárási jellemzők közötti összefüggésekre összpontosítottam. Ez azt jelenti, hogy a kutatás nem csak az infrastruktúra technikai állapotára és a közlekedési rendszerekre korlátozódik, hanem figyelembe veszi az időjárási viszonyokat is, amelyek jelentős hatással lehetnek a késésekre. A vizsgálatban az időjárási tényezők közül például a hőmérséklet, a csapadék, a szélsebesség és a köd lehetnek jelentős hatásúak.

Egy specifikus vasútvonalat részletesen is elemeztem esettanulmányként. Az ilyen földrajzi és vonal-specifikus elemzések lehetővé teszik a helyi körülmények és jellemzők figyelembevételét, valamint a helyi közlekedési infrastruktúra és időjárás sajátosságainak elemzését. A kutatás során a MÁV 30-as számú (Budapest – Székesfehérvár – Siófok – Fonyód – Nagykanizsa – Gyékényes) vasútvonalával foglalkoztam kiemelten. Ugyanakkor a kidolgozott becslő módszer alkalmazhatóságát az ország különböző vonalain ellenőriztem.

A vizsgálat eredményei alapján a közlekedési hatóságok és a vasúti szolgáltatók hatékonyabb intézkedéseket hozhatnak a késések minimalizálása érdekében. Az időjárási előrejelzések és a vonal-specifikus intézkedések, például a sebességkorlátozás vagy az alternatív útvonalak beállítása segíthetnek a vasúti közlekedés megbízhatóságának javításában és a késések csökkentésében.

A dolgozatom felépítése a következő:

A következő fejezetben bemutatom a korábbi, a tématerületen végzett kutatások főbb eredményeit. A 4., helyzetelemzés című fejezetben bemutatom, hogy milyen időjárási és vonali jellemzőkkel foglalkozok a kutatásom során, valamint részletezem a MÁV Zrt. által publikált információkat a menetrendszerűséggel kapcsolatban. Az 5. fejezetben a mélyebb megértés érdekében a 2022. évi hazai vasúti késések adatait dolgozom fel, és az időjárási késések kérdéskörében elemzéseket végzek a késések okainak a megértésére. Emellett bemutatom a késések becslhetősége érdekében kidolgozott módszert. Végül röviden összefoglalom a dolgozat tartalmát, valamint javaslatokat teszek a kutatási továbbfejlesztési lehetőségeire vonatkozóan, melyek segíthetik jobban feltérképezni az időjárási késések kapcsolatát a vasút rendszerével.

3. Irodalomkutatás

Irodalomkutatást végeztem a vasúti késések, valamint a vonali és időjárási jellemzők közötti összefüggések megértése érdekében. További célom, hogy áttekintést kapjak a korábbi eredményekről és módszerekről, így azonosítva a hiányosságokat és a további vizsgálatok lehetőségeit ezen a területen. Az előző kutatások és tanulmányok áttekintése segít abban, hogy megalapozott következtetéseket vonjak le és új megközelítéseket dolgozzak ki a probléma kezelésére.

Felhasználók véleménye a késésekről

Az utasok véleménye segít megérteni, hogyan élik meg és értékelik a vasúti késéseket, valamint milyen javaslatokat fogalmaznak meg a késések csökkentése érdekében. Számos retrospektív vasúti pontossági mutató létezik a közlekedési szektorban. A felhasználók megítélése az ilyen mutatókkal szemben segít meghatározni a leghasznosabb mutatót. A vizsgálat alapja a demográfiai jellemzők, a rendszeres utazási és a vasúti közlekedési szokások.

Egy online felmérés és egy ökonometriai modellezés segítségével bemutatták, hogy a válaszadók nagyra értékelik a pontossági mutatók hasznosságát, jellemzően a távolsági utazások megtervezésében. Mivel a felhasználók rendszeres utazásaikhoz többféle módot használnak, az utazás során már tapasztaltak negatív eseményeket (kimaradt járatok vagy csatlakozások). [2]

Egy angol tanulmány célja számszerűsíteni hogyan érzékelik az utasok a vasúti szolgáltatások megszakításait, valamint rávilágítsanak a legnagyobb arányban elégedetlenséget okozó helyzetekre, hogy a vasúti ágazat hatékonyabban kezelhesse azokat. Megállapították, hogy az utasok negatívan reagáltak a 30 percnél hosszabb késésekre, és az elégedetlenség fokozódott, ha az utasoknak útközben állniuk kellett és/vagy rossz tájékoztatást kaptak, illetve amikor a járatot törölték. Végeredményképp kijelentették, hogy a vasúti üzemeltetőknek fontos feladata a késő járatok előnyben részesítése, kiemelten a zsúfolt (álló utasok) járatokat és fontos hangsúlyt kell fektetni az információk minőségére és az információ szolgáltatás mechanizmusának a lehető legnagyobb mértékű javítására. [3]

Vasúti késések és az időjárás kapcsolata

A vasúti közlekedés hatékonyságát és pontosságát számos tényező befolyásolja, amelyek közül az időjárás egy kiemelkedő fontosságú tényező. A globális éghajlatváltozásával úgy tűnik, hogy a súlyos időjárási események egyre gyakoribbak. Ennek eredményeként a létfontosságú közlekedési hálózatok egyre inkább ki vannak téve az időjárással összefüggő események miatti zavaroknak vagy leállásoknak. A Dublin Area Rapid Transit (DART) vasúti rendszeren végzett megfigyelések alapján az időjárási viszonyok nagyvárosi ingázó vasút teljesítményére gyakorolt hatásának vizsgálatával bemutatták, hogy az időjárás jelenleg hogyan befolyásolja a közlekedési rendszereket [4]. Az időbeli hatásokat tekintve a legnagyobb késések az év utolsó harmadában figyelhetők meg, a legnagyobb mértékű novemberben jelentkeznek. Az eredmények azt mutatják, hogy az időjárási feltételek, különösen a csapadék, havazás és erős szél, negatív hatással vannak a vonatok üzemeltetésére és a késések előfordulására.

A világ számos pontján megtalálhatók a nagysebességű vasutak, melyek felveszik a versenyt a légi közlekedéssel szemben. Míg a repülés egy kevésbé korlátozott közlekedési ág, az időjárás kiemelten befolyásolja a működését. A vasút emellett a kötött pálya miatt szembesül nehézségekkel. A nagysebességű vasút a légiközlekedés versenyképes közlekedési módjává vált a közepes távolságú helyközi utazásokhoz. Ahol magas repülési késések jellemzőek, a nagysebességű vasút vonzóbb alternatívát kínálhat az utazóknak a légi közlekedéssel szemben. A nagysebességű vasút és a légiközlekedés által termelt bevétel fokozatosan csökkent a járatok késési arányának növekedésével. [6]

A szélsőséges időjárási körülményeket vizsgálva kidolgoztak egy modellezési módszert, amely segítséget nyújthat az üzemeltetőknek és a tervezőknek a közlekedési rendszer hatékonyabb működtetésében. A gépi tanulási módszereket a valós közlekedési teljesítményadatokra alkalmazva a tanulmány megvizsgálja a módszer robusztusságát, az adatjellemzők variációit és a prediktív modellező rendszer különböző alkalmazásait. Megállapították, hogy a koncepció és a modellezési keretrendszer fontos következményekkel jár a közlekedési rendszer ellenálló képességének javításában a különféle súlyos időjárási eredetű zavarokkal szemben a hatások megértése és a rendszer teljesítményének kiszámíthatósága révén. [5]

Menetrendi stabilitás és késési okok

A vasúti menetrendi stabilitás és késési okok meghatározó szerepet játszanak a vasúthálózat hatékonyságában és megbízhatóságában. A stabilitás, valamint a késési okok megértése kulcsfontosságú a vasúthálózat hatékony működésének és fejlesztésének szempontjából, és segít jobban tervezni az utazók számára is az utazásaikat, a vasútállomások számára a járataikat.

A RECIFE projekt [7] során döntéstámogató szoftvert fejlesztettek egy vasúti csomópont vagy állomás kapacitásának értékelésére. A projekt során új modellt mutattak be az időtávok stabilitásának értékelésére. A kapott eredmények rávilágítanak a többcélú stabilitás értékelésének fontosságára, amely képes több elsődleges késleltetést is figyelembe venni. Az ilyen stabilitási elemzés így megkönnyítheti a választást több változat között.

A közösségi közlekedés egyik minőségi mutatója a pontosság. A menetrendi eltérés szolgáltatási színvonal csökkenést jelent. Erősen összekapcsolt menetrendek, mint az integrált ütemes menetrend vagy sűrű vasúti forgalom esetén egyetlen késéttel a teljes hálózaton másodlagos késések dominóeffektusát okozhatja. Egy Győr környéki kutatás során a vasúti közlekedésben az állomásokon regisztrált menetrendi eltéréseket vizsgálták. [8][9] Megállapításra került, hogy a késési okok előfordulása és mértéke szerint a csatlakozásra várás, a társvasúttól átvett késés és különböző rendkívüli események (Pl.: extrém időjárási körülmények) miatt következtek be. Az idővesztés leginkább a forgalomirányítási és a műszaki hibák kiküszöbölésével lehet csökkenteni (szervezési, beruházási intézkedések). A más vasúttársaságok okozta késések kezelését a szolgáltatók között szorosabb kooperáció és adatcsere segíti; ezáltal az átszállások is hatékonyabban kezelhetők.

Létezik egy stabilitáselmélet [10] a menetrendek késésekre való érzékenységének és robusztusságának elemzésére a vasúti menetrend lineáris rendszerleírása alapján. A modell a menetrendből, a logisztikából és a megosztott infrastruktúrából adódó vonatfüggéseket tartalmazza.

A stabilitás a vasúti rendszer önszabályozó magatartása annak érdekében, hogy fennakadások után visszatérjen a vasúti menetrend szerinti állandó állapotba. A max-plus megközelítés lehetővé teszi a nagyszabású időszakos vasúti menetrendek valós idejű elemzését. A holland nemzeti vasúti menetrend esettanulmánya szemlélteti a kidolgozott módszertanban rejlő lehetőségeket megbízható vasúti menetrendek kialakításának támogatására sűrű vasúti forgalmi hálózatokban.

Modellek a késések előrejelzésére

A technológia és az adatelemzés területén bekövetkező előre lépések lehetővé teszik olyan modellek létrehozását, amelyek segítségével előrejelzések készíthetők a vasúti késésekkel kapcsolatban. Ezek a modellek különféle tényezőket, például időjárási feltételeket, gépészeti hibákat és infrastrukturális problémákat vesznek figyelembe annak érdekében, hogy segítsenek a vasúti rendszerek hatékonyabb működésében és az utasok számára kellemesebb utazási élmény biztosításában.

A vonatkésések közeljövőbeli és pontos előrejelzése kiemelten fontos a vasúti üzemeltetés és az utasok utazási élménye szempontjából. Holland vasúti adatok alapján kifejlesztettek egy Markov-modellt a közeli időtartamú vasúti késések előrejelzésére [11]. A kutatás eredményei alapján a modell hatékonyan képes megjósolni a késéseket. Numerikus tesztek azt mutatják, hogy ez a megközelítés jobban teljesít más összehasonlítási alapokhoz képest az előrejelzés pontosságában. Emellett a javasolt modell nem igényel bonyolult tanítási folyamatot, és alkalmas nagy léptékű előrejelzési problémák kezelésére.

A vasúti rendszer összetettsége és a tér-időbeli jellemzők miatt, a gyakorlatban gyakran nehéz megjósolni a vonatok késését. Az eredmények azt mutatják, hogy modell felülmúlja a többi klasszikus módszert. Az információk háttérből az előtérbe történő figyelembevétele segít a modellnek a vonatkésések pontosabb előrejelzésében. [12]

A globális energiahiány és az elektromos energia iránti növekvő kereslet még fontosabbá teszi az energiatakarékos menetrend kidolgozását a városi vasúti vonatok számára. Normál körülmények között a vonat az energiatakarékos menetrend szerint közlekedhet, azonban a vonatok eltérhetnek az eredeti menetrendtől és megnövelhetik az energiafogyasztást a késések miatt. Nagy kihívást jelent, hogy a vonatot miként lehet gyorsan hatékony forgalomba állítani, és a késésben lévő utasokat mielőbb célba juttatni. Egy energiamegtakarítási optimalizációs módszer kidolgozásával a városi vasúti közlekedés késéseinek befolyásoló hatását vizsgálták Ázsiában [13]. A Nanning Rail Transit (NNRT) 5-ös vonalán egy esettanulmány segítségével ellenőrizték a javasolt modellt és módszert. A kutatás eredményei azt mutatják, hogy az optimalizált menetrendek képesek csökkenteni az energiafelhasználást és javítani a vasúti szolgáltatás hatékonyságát.

Összegzés

Számos kutatás foglalkozott már a vasúti késések és az időjárás közötti kapcsolattal. A korábbi vizsgálatok gyakran a késések okainak azonosítására és az infrastrukturális tényezők, például a pályaállapot, a vonatüzemi rend és a karbantartási gyakorlatok elemzésére összpontosítottak. Többféle megközelítést és modellt is kifejlesztettek a vasúti késések és a vonali/időjárési jellemzők közötti összefüggések jobb megértése érdekében. Az eredmények alapján a vonali tulajdonságok, a menetrend stabilitása, az időjárési feltételek és a technikai problémák mind fontos tényezők lehetnek a vasúti késések előfordulásában és a szolgáltatás minőségében. Azonban további kutatásokra van szükség ezen a területen a vasúti késések és a vonali/időjárési tényezők közötti összefüggésekről a mélyebb megértése, valamint hatásainak megértése érdekében.

4. Helyzetelemzés

4.1. Késést befolyásoló tényezők azonosítása

A késéseket befolyásoló tényezők azonosításához a MÁV Zrt. Pályavasút Üzletág 2022 évben közlekedő személyszállító vonatjainak adatsorát használtam, amely tartalmazza a késések okait is. Ezek alapján azonosíthatóak a vonali, valamint időjárási jellemzők, melyek befolyásolhatják a késéseket.

Időjárási jellemzők

Az időjárási jellemzők magában foglalnak minden olyan helyzetet, szituációt, amikor valamilyen (szélsőséges) időjárási körülmény miatt a vonatok akadályba ütköznek vagy sebességcsökkentésre kényszerülnek, ami késésekhez vezethet.

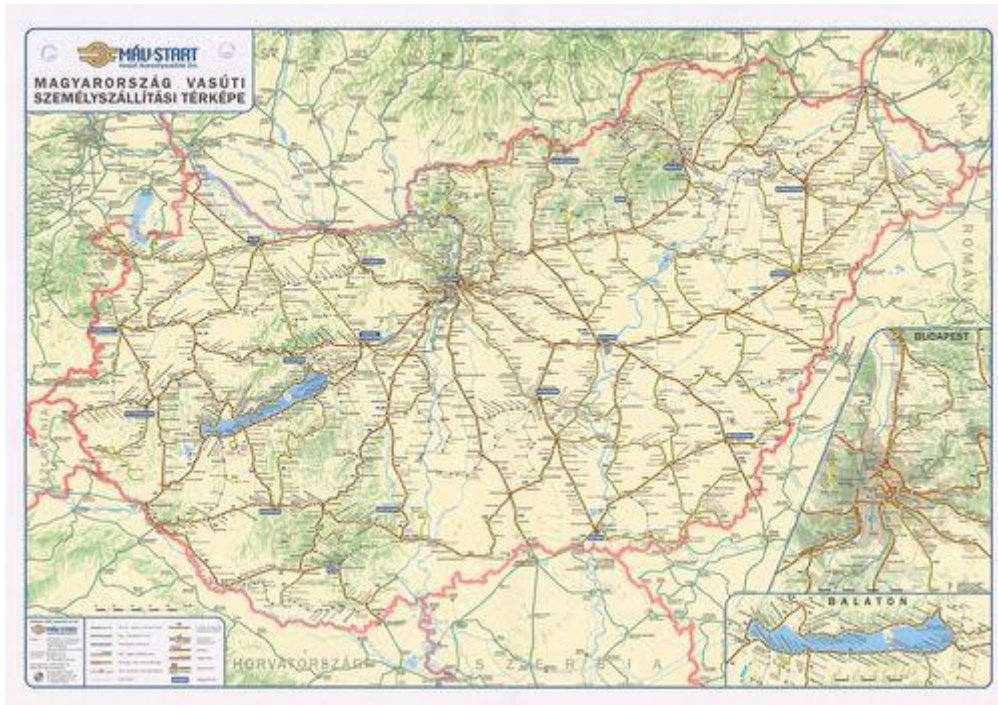
A szél, a csapadék és a hőmérséklet hármasának különböző kombinációi számos módon befolyásolhatják a vasúti késések mértékét. Az erős csapadék vagy a köd korlátozza a látást, így óvatosabb, lassabb közlekedésre kényszeríti a mozdonyvezetőket. A szél oda nem illő anyagokat (faág, falevél) fújhat a vasúti pályára, melynek következménye a vonatok rendkívüli megállása lehet. A csapadék és a szél együttes hatásaiból a menetdinamika görbéje változhat, mivel a csúszós pályán nagyobb út szükséges a gyorsításra és a fékezésre egyaránt. Továbbá a hőmérséklet befolyásolhatja a vasúti pálya állapotát.

Emellett számos olyan következménye is lehet a különböző időjárási viszonyok miatt, melyet előre jósolni nehéz. Például a nagy szél fákat dönthet a pályára vagy leszakíthatja a felsővezetőket, ezzel lehetetlenné téve a közlekedést, vagy a sok csapadék miatt különböző biztosítóberendezési zavarok léphetnek fel, melyek lassítják a vasúti közlekedést.

Vonali jellemzők

A vonali jellemzők a megengedett sebéséget, a vasútvonal minőségét befolyásolhatják. Ilyen vonali jellemző többek között a földrajzi fekvés, a környező növényzet, a víz és lakott terület közelsége, valamint a domborzat.

Egy vasútvonal földrajzi fekvéséből következtethető, hogy mennyire sík területen halad keresztül, így például a szélnek mennyire van kitéve vagy milyen vízgyűjtő területen fekszik. Emellett következtethető, hogy a folyó- vagy álló víz közelsége milyen következményekkel járhat akár egy esetleges áradás esetén. Az 2. ábra a magyar vasútvonalhálózatot szemlélteti a domborzati viszonyokkal kiegészítve.



2. ábra: Magyarország vasúti személyszállítási térképe (2010)
(forrás: <https://maps.hungaricana.hu/hu/HTITerkeptar/34539/>)

A dolgozatban lehatárolásként részletesen elemezett MÁV 30. sz. vasútvonalát áttekintve a következő megállapításokat tettem. Budapest és Székesfehérvár között a Velencei tó déli partján fut a vonal egy viszonylag sík területen. Hipotézisem, hogy ezen a szakaszon jelentős lesz a szelek miatti késés. Székesfehérvár és Balatonszentgyörgy között a Balaton déli partján fut a vonal. Ez a szakasz különösebb domborzati sajátossággal nem rendelkezik, az egyetlen veszélyforrás a tó áradása lehet, ugyanakkor ez nem gyakori a vízszint szabályozhatósága miatt. Balatonszentgyörgytől a határ felé a Kis-Balaton térségében fut a vonal, mely egy kifejezetten saras, lápos terület és igen sűrű növényzettel rendelkezik. Így ezen a területen a pálya elmosása vagy a fák miatt a pálya elzárása okozhat késéseket.

4.2. Késés mértéke a magyar hálózaton

Az összefüggések feltárása érdekében az adatok gyűjtése és elemzése kulcsfontosságú. Fontos lehet a vasúti üzemeltetőktől és időjárési szolgáltatóktól származó adatok összekapcsolása, a vonali és időjárési jellemzők hatásainak vasúti késésekre gyakorolt hatásainak megértése érdekében.

A MÁV-Csoport jelentése alapján (4.1.-4.2. táblázat, 3.-4. ábra), 2022-es országos vasúti késési adatok alapján elemeztem, hogy az év mely szakaszaiban jellemzőbbek inkább a késések és következtetéseket vontam le az okokra vonatkozóan a mélyebb késési okokat még nem azonosítva (ország összes vasútvonalat tekintve). Az 4.1. táblázat a feláras országos és az elővárosi vonatok menetrendszerúségét mutatja be. Az 4.2. táblázat az országos és a regionális vonatok menetrendszerúségét reprezentálja. Az értékek egy arányszámot mutatnak, amely megadja, hogy az adott hónapban az adott vonatnembe tartozó vonatok hány százaléka közlekedett menetrend szerint, a MÁV által maximálisan eltűrt (5 vagy 15 perc) késéssel.

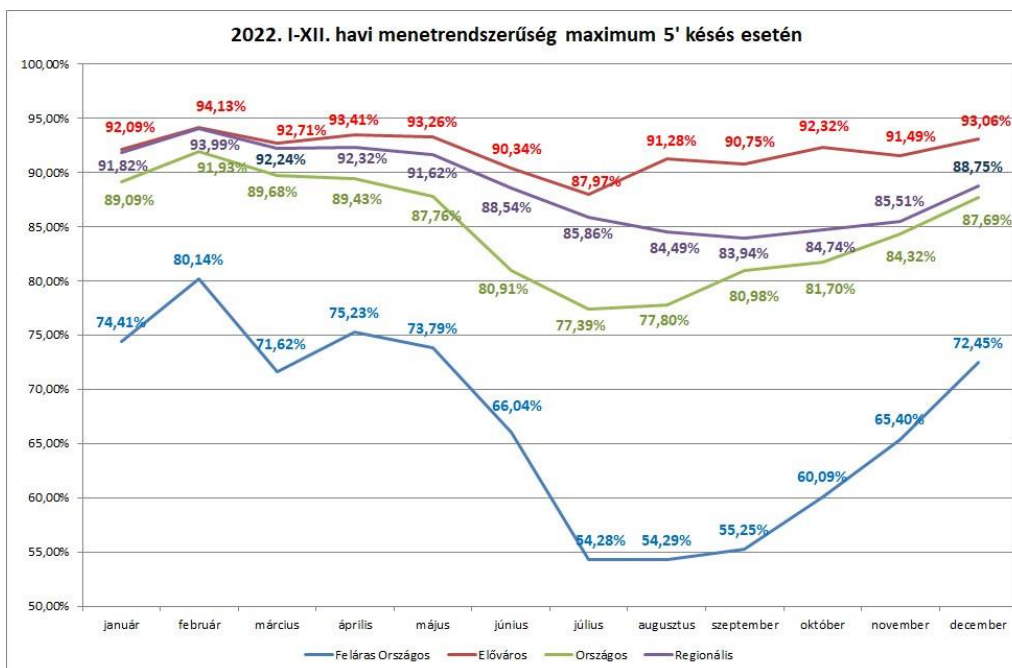
4.1. táblázat: 2022. évi menetrendszerúségi adatok feláras országos, valamint elővárosi vonatokra [%]
forrás: <https://www.mavcsoport.hu/mav-start/bemutakozas/menetrendszeruseg> (2022)

Időszak	Feláras Országos		Előváros	
	max. 5' késésre	max. 15' késésre	max. 5' késésre	max. 15' késésre
január	74,41	90,60	92,09	98,08
február	80,14	93,66	94,13	98,76
március	71,62	88,71	92,71	98,76
április	75,23	91,21	93,41	98,85
május	73,79	90,16	93,26	98,78
június	66,04	85,38	90,34	98,07
július	54,28	78,01	87,97	97,37
augusztus	54,29	77,85	91,28	98,58
szeptember	55,25	77,67	90,75	98,28
október	60,09	81,25	92,32	98,78
november	65,40	85,20	91,49	98,23
december	72,45	88,58	93,06	98,79

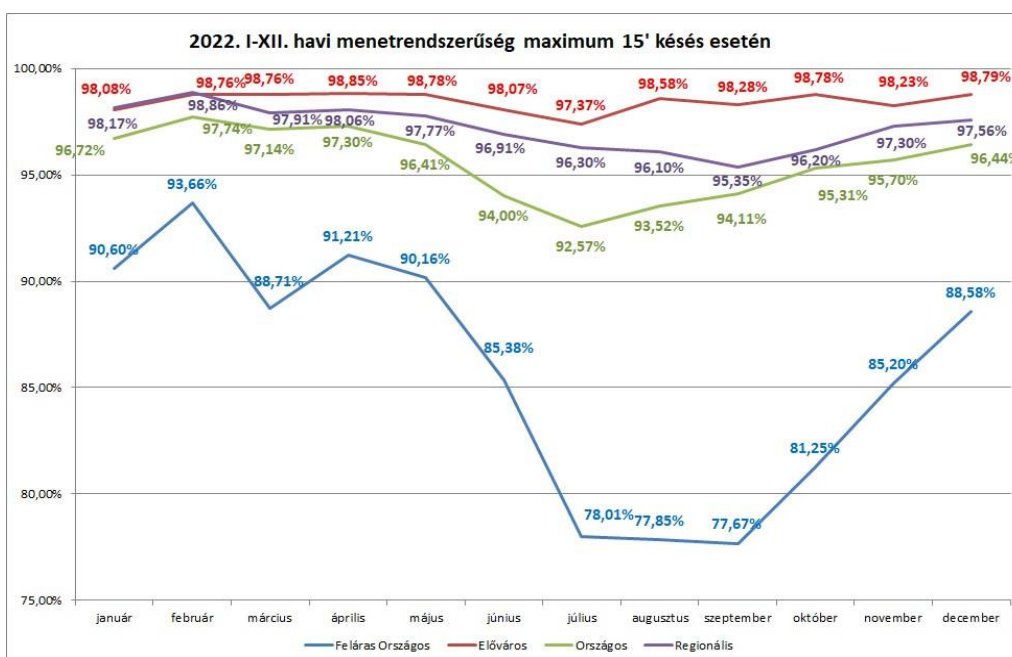
4.2. táblázat: 2022. évi menetrendszerőségi adatok országos, valamint regionális vonatokra [%]
 forrás: <https://www.mavcsoport.hu/mav-start/bemutakozas/menetrendszeruseg> (2022)

Időszak	Országos		Regionális	
	Menetrendszerőség		Menetrendszerőség	
	max. 5' késésre	max. 15' késésre	max. 5' késésre	max. 15' késésre
január	89,09	96,72	91,82	98,17
február	91,93	97,74	93,99	98,86
március	89,68	97,14	92,24	97,91
április	89,43	97,3	92,32	98,06
május	87,76	96,41	91,62	97,77
június	80,91	94,00	88,54	96,91
július	77,39	92,57	85,86	96,30
augusztus	77,80	93,52	84,49	96,10
szeptember	80,98	94,11	83,94	95,35
október	81,70	95,31	84,74	96,20
november	84,32	95,70	85,51	97,30
december	87,69	96,44	88,75	97,56

A 3. ábra, valamint a 4. ábra a maximális 5, illetve maximális 15 perc késés esetén mutatja be a vonatok menetrendszerőségét különböző vonatkegóriák (feláras országos, országos, elővárosi, regionális) szerint. Megállapítottam, hogy a késő vonatok jelentős része 5-15 perc közti késéssel rendelkezik, a maximális 15 perc késés esetén a jóval magasabb menetrendszerőség tapasztalható, mint a maximális 5 perc esetén. Továbbá az országos vonatok jóval pontatlanabban az elővárosi és a regionális vonatokkal szemben. Megfigyelhető az országos vonatok esetében egy kiugrás a nyári időszakban, ahol a menetrendszerőség lecsökken és a feláras országos vonatok csaknem negyede több mint 15 percet késik. Ez a kiugrás feltételezhetően a nyári hőségnek és a megnövekedő utasforgalomnak köszönhető. Tulajdonképpen egy láncreakció alakul ki, mivel a növekvő utasforgalom miatt a szolgáltató növeli a kínálatot, ezáltal növeli a hibalehetőségeket is.



3. ábra: 2022. évi menetrendszerűség maximum 5 perc késés esetén
(forrás: <https://www.mavcsoport.hu/mav-start/bemutakozas/menetrendszeruseg>)



4. ábra: 2022. évi menetrendszerűség maximum 15 perc késés esetén
(forrás: <https://www.mavcsoport.hu/mav-start/bemutakozas/menetrendszeruseg>)

Összességében megállapítható, hogy a magyar vasút 2022 évi menetrendszerűségével érdeemes foglalkozni, mivel közel sem elfogadható ez a szint. Bár a regionális és elővárosban utazók kevésbé érzékelik a késéseket, a távolsági utazók számára rengeteg kényelmetlenséget okozhatnak a vasúti késések.

5. Eredmények és értékelés

A fejezetben bemutatom a késést befolyásoló tényezők feltárt kapcsolatait. A MÁV Zrt. által rendelkezésemre bocsátott 2022. év személyszállító vonataira vonatkozó adatokat vizsgáltam. Az adattábla a következő attribútumokat tartalmazza:

- Késés oka
- Késés felelőse
- Vonatadatok (vonatnem, vonatszám, közlekedés dátuma)
- Késés rögzítésének a helye
- Késés mértéke
- Indoklás

Összesen több, mint 2 millió rekorddal dolgoztam, melyből csak az időjárési okból késő vonatok adatait vizsgáltam. Az adatok szűréséhez Microsoft Access adatbáziskezelő szoftverben lekérdezéseket készítettem. Sorfeltételként a következő okokat adtam meg: „időjárási behatások (vis major)” és az „árvíz, belvív”.

5.1. Adatelemzés – országos vasúthálózat

Az adatokat először országos szinten elemeztem. Az alfejezetben a teljes országos vasúthálózaton elforduló késési okokat mutatom be. Ezáltal széleskörű képet kapunk arról, hogy mik a legjellemzőbb késési okok, valamint az időjárási késések hol helyezkednek el a késési okok gyakorisági listáján.

Késési okok

A 5.1.-5.2. táblázatban bemutatom, hogy milyen késési okok jelennek meg az adatsorban. A táblázatban feltüntettem a számított alap statisztikai jellemzőket késési okokként: vonatok száma, átlagos késés és a legmagasabb késési érték.

A tavalyi évben több mint 2 millió késést rögzítettek a MÁV hálózatán, melyek számos különböző forrásokból eredhetnek. Ezek között megtalálhatók technikai problémák, időjárási hatások, balesetek, berendezési zavarok és emberi tényezők is.

5.1. táblázat: 2022. év vasúti késéseinek elemzése okokra bontva /1

forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját összesítés

Késési okok	Késett vonatok száma [db]	Átlagos késés [perc]	Maximális késés [perc]
31 -Ideiglenes sebességkorlátozás	479 994	1,40	21
8V -Váratlan vasúti esemény	372 701	24,60	940
1M -Vonatforgalom szabályozás más vonat késése miatt	331 975	3,43	231
22 -Tartózkodási idő túllépése	169 442	1,29	43
21 -Menetidő túllépés	160 100	1,18	12
90 -További vizsgálatot igényel	145 648	5,51	241
1K -Vonatforgalom szabályozás a vonat korábbi (saját) késése miatt	86 340	2,90	351
15 -Csatlakozásra várás	69 667	4,58	133
16 -Fordulásra várás	37 065	9,85	281
29 -Tervtől eltérő vonatösszeállítás vasútállomási okból	35 294	2,09	111
20 -Vasúttársasági előkészítés	24 376	5,13	216
66 -Egyéb vasútüzemi berendezések zavarai	23 810	6,74	33
82 -Szomszéd pályavasúttól átvett késés	18 101	19,01	480
33 -Sebességkorlátozás külön rendelet alapján	14 843	1,83	21
11 -Vonatforgalom szabályozás megrendelői igények alapján	13 714	9,66	245
60 -Biztosítóberendezési zavar	9 918	5,72	127
7V -Vonatszemélyzeti okok	9 482	2,48	90
7F -Forgalmi személyzeti okok	9 391	1,89	171
43 -Vontatójármű zavarai	8 327	6,37	132
61 -Látszólagos foglaltság	6 928	4,86	71
86 -Időjárási behatások (vis major)	6 518	9,89	303
62 -Útátjáró biztosítóberendezési zavar	5 970	5,03	53
8B -Közlekedő vonat balesete	3 229	12,22	792
87 -Berendezés rongálás, lopás	3 116	5,92	113
88 -Idegen behatások	2 567	7,63	156
84 -Hatósági intézkedések	2 450	13,83	300
52 -Zavarok a személyszállító kocsiknál	2 343	7,5	102
6B -Váltó-meghibásodás	2 147	7,16	144
89 -Árvíz, belvíz	1 902	1,83	7
8S -Személy gázolása	1 714	24,57	445
68 -TEB Építési, karbantartási és vizsgálati munkák miatti késések	1 710	3,39	35
64 -A villamos vontatás helyhez kötött berendezései, felsővezetéki zavar	1 587	11,48	424
32 -Pálya meghibásodás	1 419	3,75	54
38 -Vágányzár miatt vonatpótló autóbusz közlekedés (tervezett vágányzárban)	1 371	6,64	95
44 -Vontatójármű üzemképtelensége	1 101	34,92	221
77 -Átvevő vállalkozó vasút miatti késés	800	6,74	380
81 -Szomszéd pályavasút miatti késés (kilépéskor)	580	21,11	267

5.2. táblázat: 2022. év vasúti késéseinek elemzése okokra bontva /2

forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját összesítés

Késési okok	Késett vonatok száma [db]	Átlagos késés [perc]	Maximális késés [perc]
76 -Átadó vállalkozó vasút miatti késés	524	5,94	148
8L -Állat gázolása	478	12,82	235
8J -Közúti jármű elütés	343	43,20	301
51 -Vezérlőkocsi zavarai	320	12,95	72
3R -Rendkívüli vágányzár	179	4,50	28
65 -Pályavasúti informatikai rendszerek működési zavarai	173	7,10	44
28 -Menetrendi problémák	161	1,03	3
34 -Pályafenntartás, pályaépítés közbeni szabálytalanság	134	7,74	52
13 -Helytelen forgalomszabályozás	106	5,91	46
3T -Vágányzár túllépés	105	6,71	76
55 -Pályamenti jármű diagnosztikai mérő bejelzett	88	9,52	44
3N -Kiutalt menetvonalak zavarása nélkül engedélyezett tevékenység	74	2,71	11
39 -Utaskiszolgáló létesítmények okozta késések	68	1,80	6
8O -Tolatási balesetek	51	24,07	108
78 -Menetrend szerint vonatot helyettesítő autóbusz késése (nem vágányzári menetrend esetén)	48	18,40	90
19 -Vonattal kapcsolatos technológiai műveletek elvégzésére vár	47	4,11	16
8A -Személyi baleset	44	20,96	106
57 -Zavarok a teherkocsiknál	22	5,02	13
17 -Forgalomlebonyolítási hiba	14	12,25	128
63 -Távközlő berendezési zavar	14	12,37	113
8M -Munkabaleset	10	11,48	29
54 -Zavarok más vontatott járműveknél	9	12,83	52
85 -Időszámítás változás	4	44,25	60
35 -Pályaépítési előkészítés	3	6,75	12
Összesen:	2 070 662	9,57	940

Az időjárással kapcsolatos késések – Időjárási behatások (vis major) és az árvíz, belvíz – a teljes év késéseinek csupán a 0,41 %-át teszi ki, így megállapítható, hogy a vasúti késések mérséklése érdekében más vizsgálatok is szükségesek, mivel ez a kutatás a késések csak kis részével foglalkozik. Ugyanakkor ez a 0,41% is 8 420 darab késést jelent, amelyek előrebecslésével a szolgáltatási színvonal is növelhető (tájékoztatás nyújtása, felkészülés és gyorsabb beavatkozás az adott időjárási helyzetben).

Időjárási és vonali jellemzők közti kapcsolat

Az időjárási jellemzők önmagukban nem okoznak késéseket, jellemzően valamilyen következménnyel járnak. Ennek feltárása érdekében megvizsgáltam, hogy a szűrt adatokban mely vonat milyen időjárási ok és ennek milyen következménye miatt késett.

Ez alapján ok-következmény párokat képeztem, hogy megértssem, hogyan alakulnak az időjárási késések és ehhez milyen vonali jellemzők járultak hozzá. A párok a következőképpen alakultak:

- Erős, viharos szél – sebességkorlátozás/felsővezetékszakadás
- Vihar – áramellátási zavar/biztosító berendezési hiba
- Csapadék, őszi időjárás – csúszós sínek

Ezeket részletesen vizsgálva kiderül, hogy az időjárási és a vonali jellemzők miként befolyásolják a vonatok késését.

Erős, viharos szél

Az erős, viharos szél igen jelentős hatással lehet a vasúti közlekedésre. A szél okozta veszélynek elsősorban a felsővezeték és a járművek áramszedői vannak kitéve. Vonali jellemzők tekintetében azt érdemes vizsgálni, hogy a szél közvetlenül vagy valamilyen akadályt (dombok, hegyek, erdők) érintve érik el a vasúti pályát.

Az erdők és erdős területek jelentős szélárnyékokat képeznek, amelyek megvédhetik a pályát a közvetlen szélhatástól. Azonban erős, viharos szél esetén az erdők akadályozhatják is a vasúti közlekedést, mivel a szél faágakat fújhat a sínekre vagy fákat dönthet a felsővezetékre, akadályozva vagy blokkolva ezzel a vasúti közlekedést.

Hasonlóképpen, a dombok és a hegyek is hatékony szélárnyékokat képezhetnek. Bár az erős szél a hegyeket is felhasználhatja a szélirány megváltoztatására, ami különféle kihívásokat jelenthet a vasúti közlekedés számára.

Így ki lehet jelteni, hogy elsősorban azok a területek érzékenyek a szeles időjárásra, ahol a vágányok semmilyen környező domborzati, vagy növényzeti tényezővel nincs ellátva. Ezt az adatsor igazolja, mivel a leggyakoribb szél miatti, így sebességkorlátozással járó késés a Tárnok – Martonvásár – Gárdony – Székesfehérvár szakaszon történt, ami valóban egy ilyen tulajdonsággal rendelkező szakasz.

Vihar

A viharos időjárás, különösen az intenzív esőzések és zivatarok, számos vonali jellemző kapcsolatában okozhat késéseket a vasúton. Az egyik fontos tényező a nem megfelelő vízelvezetés, amely a vasúti pályák környezetében vagy alatt problémákat okozhat. Az esővíz gyors lefolyása vagy a felszín alatti vízelvezető rendszerek hiánya miatt a víz felhalmozódhat a sínek körül, és akár el is áraszthatja a pályákat. Emellett zárlatokat okozhat a sínáramkörökben és a különböző külső téri biztosító berendezési elemekben. Az ilyen jellegű hibák a biztosítóberendezés zavarait okozhatja, amely lassabb közlekedésre kényszeríti a vonatokat.

Az olyan területeken, ahol hegyek és dombok találhatóak, a viharos esőzések még nagyobb problémákat okozhatnak. A lejtős területeken a víz könnyen lefolyhat a hegyekről vagy dombokról, és elöntözheti a vasúti pályákat. Viharos időjárás esetén a lezúduló víz és az esetleges földcsuszamlások veszélyeztethetik a vasúti infrastruktúrát, beleértve a pályákat, alagutakat és hidakat is, ezzel lehetetlenné téve a vasúti közlekedést.

Csapadék, őszi időjárás

Az őszi időjárás és a csapadék, például az eső és a nedves lomb, jelentős problémákat okozhatnak a vasúton a sínek csúszósságával kapcsolatban. Az őszi hónapokban a fák elkezdik elhullajtani leveleiket. Ezek a lehulló levelek gyakran kerülnek a sínekre, és a vonatok kerekei alá kerülve tapadást csökkentő hatást érnek el. Emellett csupán a csapadék (eső, hó) is csúszóssá teheti a síneket. Az ilyen pályán közlekedő vonatok menetdinamikája megváltozik. Hosszabb gyorsításra és fékezésre van szükség, mivel a fém-fém kapcsolat miatti alacsony tapadási tényező még jobban romlik.

5.2. Késést becselő módszer

Céлом, függvénykapcsolatok felállítása volt a késést befolyásoló időjárási jellemzők és a késé mértéke között. Az adatok elemzése során az időjárásból fakadó késéseknek különböző következményeit vizsgáltam. A legtöbb esetben egy átlagos értéket kaptam eredményül, kiegészítve a lehetséges eltérésekkel.

Mivel a késések mértékét vonali jellemzők is befolyásolják, így vonalanként, vagy hasonló vonali adottságokkal bíró vonalcsoportokra külön-külön függvénykapcsolatok állíthatók fel. Jelen kutatásomban a késéseket becselő módszeremet a MÁV 30. számú (Budapest – Székesfehérvár – Siófok – Fonyód – Nagykanizsa – Gyékényes) vasútvonalon közlekedő vonatok késése alapján készítettem. A MÁV 30. számú vasútvonalán a 2022. évben az időjárásból fakadó késéseket az 5.3. táblázat szemlélteti. Megjelenik minden olyan következmény, amely a vizsgált időszakban megjelenik és bemutatom azt is, hogy ezek a következmények milyen ok(ok) miatt alakultak ki.

A táblázatban szereplő adatok számítási módja a következő:

- n : a késett vonatok darabszáma [db]
- R_{\min} : Minimum késési érték [perc]
- R_{\max} : Maximum késési érték [perc]
- \bar{t} : Átlagos késési érték [perc] $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum t$
- s : Átlagtól való átlagos eltérés (szórás) [perc] $s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (t - \bar{t})^2}$

5.3. táblázat: Késési okok összesítése [perc]

forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés

Következmény megnevezése	Időjárási ok	n	R _{min}	R _{max}	\bar{t}	s
<i>Állomástávolságú közlekedés</i>	<i>Vihar</i>	6	2	8	5,67	2,21
<i>Áramellátási zavar</i>	<i>Vihar, erős szél</i>	9	3	63	14,44	18,89
<i>Leeresztett áramszedős közlekedés</i>	<i>Erős szél</i>	4	1	3	2,00	1,00
<i>Biztosítóberendezési meghibásodás</i>	<i>Vihar</i>	2	3	5	4,00	1,00
Csúszós sínek	Nyirkos, faleveles, őszi időjárás	44	2	7	1,68	1,24
<i>Fabedőlés</i>	<i>Vihar</i>	1	10	10	10,00	0,00
Felsővezeték szakadás	Erős szél	47	2	290	53,66	77,92
Hamisfoglaltság	Vihar	39	1	11	4,92	2,21
<i>Mindenhol megálló vonat</i>	<i>Vihar</i>	1	3	3	3,00	0,00
Sebességkorlátozás	Erős szél, köd, saras pálya (aljzat)	199	1	30	5,24	4,68
Használhatatlan sorompó	Vihar	82	2	48	10,98	7,58
<i>Szolgálatképtelen mozdony (áramszedő törés)</i>	<i>Vihar</i>	3	27	58	40,67	12,92
<i>Korlátozott távolbalátás</i>	<i>Köd</i>	1	5	5	5,00	0,00
<i>Vonatpótló autóbuszos közlekedés</i>	<i>Vihar, erős szél</i>	49	2	99	28,55	19,52

Jelmagyarázat: szürke háttér és dőlt betű: A további elemzésből kihagyott adatok

Azokat a sorokat, melyek olyan adatokat tartalmaznak, melyekkel nem foglalkozok a továbbiakban szürke háttérrel és dőlt betűkkel láttam el, ezáltal kiemelve, hogy mely adatok relevánsak az adatelemzésem és a módszer kidolgozása során.

Az alacsony előfordulás bizonytalan képet ad, valamint a vonatpótló autóbuszos közlekedés számos bizonytalansági tényezővel jár, így a továbbiakban csak a csúszós sínek, a felsővezeték szakadás, a hamisfoglaltság, a sebességkorlátozás és a használhatatlan sorompó kérdéskörét vizsgáltam.

Csúszós sínek

A csúszós, nyirkos sínek legjellemzőbb kiváltó okai a vizes, faleveles pálya, mely az őszi hónapokban a legjellemzőbb, de bármilyen csapadékos napon gondot okozhatnak. A téli időszakban az alacsony hőmérséklet ráadásul jégréteget is képezhet a pályám, ami további tapadáscsökkentő hatással jár.

Az adatok azt mutatják, hogy a vasúti késések időtartama viszonylag alacsony, mivel a késések 1 és 7 perc közé estek. Az átlagos késés 1,68 perc, ami azt jelzi, hogy a késések túlnyomórészt rövidek és viszonylag kismértékűek. Emellett a szórás értéke 1,24, ami azt jelenti, hogy általánosságban kijelenthető, hogy a csúszós sínek miatt a vonatok átlagosan $1,5 \pm 1$ perc késést szenvednek el.

Fontos megjegyezni, hogy a csúszós pálya által okozott menetidő többlet jellemzően a gyorsítás és a fékezés során keletkezik. A kisebb tapadás jóval hosszabb utat igényel a vonatok gyorsításához és fékezéséhez. Ez azt is eredményezi, hogy ez az érték ez minden egyes megállás alkalmával újra jelentkezik.

A csúszós sínekből fakadó késések becslési lehetősége, a korábban kapott érték szorzása annyival, ahányszor olyan helyen áll meg a vonat, ahol a pálya valamilyen tapadáscsökkentő tulajdonsággal (falevelek, vizes, jeges sínek) rendelkezik.

Felsővezeték-szakadás

A vizsgált adatok alapján a felsővezeték szakadásának kiváltó okai a vasúti késésben a viharok és az erős szélhatások miatt kialakuló többlet erő kifejtés a felsővezeteki hálózatra, valamint a vasúti járművek áramszedőire.

Megállapítható, hogy a késések értéke 2 és 290 perc közé esik, ami egy nagyon tág intervallum. Emiatt feltételezhető, hogy az adatok becslése igen torz eredményt adhat. Ezt bizonyítja, hogy az átlagos késés értéke 53,66 perc, valamint az átlagtól való átlagos eltérés 77,92 perc. Ebből arra következtethetünk, hogy jellemzőbbek az egy óránál magasabb késések felsővezeték szakadás esetén.

Összességében, a felsővezeték szakadása komoly hatással lehet a vasúti közlekedésre, a késések széles terjedelme miatt pedig fontos, hogy a rendszer hatékonyan tudjon reagálni az ilyen eseményekre. Az ilyen hatékony reagálásra egy módszer lehet a viharos időjárás előrejelzése esetén tartalék vonatpótló autóbuszok állomásoztatása a veszélyeztetett zóna állomásaira.

Hamisfoglaltság

A hamisfoglaltság megértése érdekében fontos megismerni a hazai vasúti foglaltságérzékelés azon fajtáját, ahol ez a jelenség megtörténhet. Bizonyos szakaszokon a vasúti pályában úgynevezett sínáramköröket alkalmaznak, mely során a vasúti járművek kerekei kisöntölik az áramkört, ezzel elejtve egy jelfogót, ami a pálya foglaltságát közvetíti a forgalomirányítás felé.

Tehát a hamisfoglaltság kiváltásának oka a két sín pár valamilyen módon történő zárása valamilyen vezető (jelen esetben víz) segítségével. A nagy esőzések és a nem megfelelő vízelvezetés kialakítása könnyen eredményezhetik a vasúti pálya hamisan foglaltnak jelzését. Emiatt a vasúti közlekedés csak korlátozásokkal bonyolítható le.

Az adatok alapján a késések jellemzően 1 és 11 perces intervallumba estek. Az átlagos késés mértéke 4,92 perc, a szórás 2,21 perc. Ezekből megállapítható, hogy amikor számítunk a hamisfoglaltság megjelenésére, akkor jellemzően 3-7 perc késéssel lehet számolni.

A javasolt megoldás lehet az infrastruktúra fejlesztése és a berendezések időjárásállóságának növelése, hogy minimalizálják a hamis foglaltságok kialakulását és ennek eredményeként a vasúti késéseket.

Használhatatlan sorompó

A vasúti útátjárók használhatatlansága a hamisfoglaltsághoz hasonló okok miatt következik be. A nagy esőzések az átjárók behatási pontjainál tévesen vonatot jeleznek, ezáltal zavar állapotot kiváltva. Emellett a külső téri biztosítóberendezési elemekben is keletkezhetnek záratok, melyek használhatatlanná teszik a sorompókat.

A széles terjedelem (2-48 perc), az átlagos 10,98 perc és az átlagtól való átlagos 7,58 perc eltérés azt mutatja, hogy a késések közepesen jól becsülhetőek. Megállapítható, hogy a késések jellemzően $11 \pm 7,5$ perc környékén mozognak, tehát amikor a vasúti átjárók használhatatlanságára nagy a valószínűség, akkor az utasok felé várhatóan 5-20 perces késést lehet kommunikálni.

Összességében az adatok alapján megállapítható, hogy a használhatatlan sorompók okozta vasúti késések jelentős mértékben változhatnak, de átlagosan néhány perces késést eredményeznek. Néhány esetben előfordulhatnak hosszabb, akár 40-50 perces késések is. A vasúti rendszer szempontjából fontos lehet olyan megelőző intézkedéseket (sínáramkörök helyett tengelyszámlálók, vagy jobban szigetelt biztosítóberendezési elemek) tenni, amelyek csökkentik ezen késéseket és minimalizálják az utasokra gyakorolt negatív hatásokat.

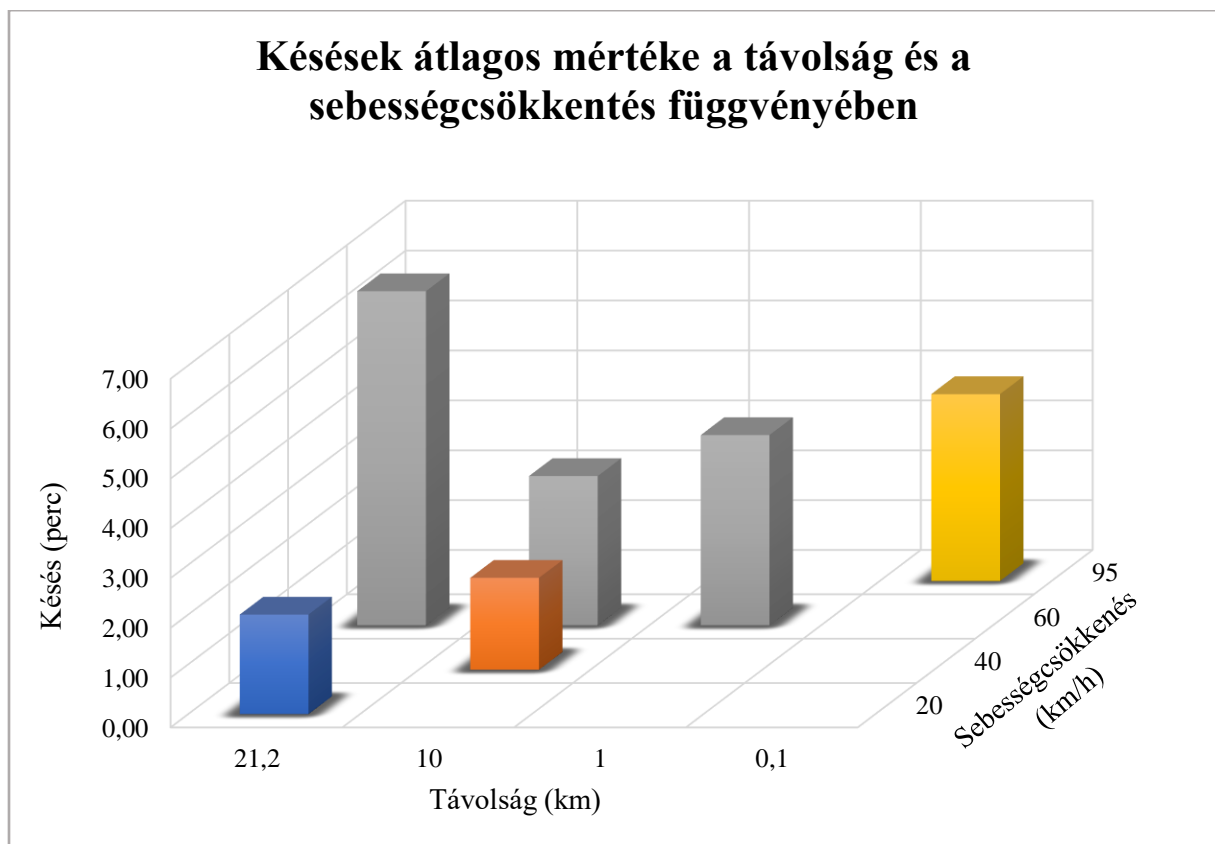
Sebességkorlátozás

A vasúton a sebességkorlátozások számos okra vezethetők vissza. Időjárási szempontból az okok a sűrű csapadék (eső, hó) és a köd által okozott korlátozott távolbalátás, valamint az erős szél okozta erőhatások a felsővezetékre és a járművek áramszedőire.

Mivel a sebességkorlátozás igen gyakori az időjárási késések esetén, valamint a kapott táblázat megjegyzés rovata tartalmazta a korlátozás hosszát és mértékét, így a késések becslése érdekében részletesebb elemzést végeztem.

Először a távolságok és a sebességcsökkentés mértéke alapján átlagos késést számoltam, melynek eredményeit az 5. ábra szemlélteti. Az adatok alapján a legmagasabb átlagos késés a hosszú szakaszon (21,2 km) közepes sebességcsökkentés (120 km/h pályasebességnél 60 km/h sebességcsökkentés) mellett keletkezett.

Ezután a távolságot és a sebességcsökkenést külön-külön elemezve függvényeket hoztam létre. Az 5. ábra alapján az elsődleges megállapításom, hogy a távolság alapú késéseket egy parabola függvény, míg a sebességcsökkenés alapú késést egy exponenciális függvény szemlélteti.



5. ábra: Késések átlagos mértéke a távolság és a sebességcsökkentés függvényében

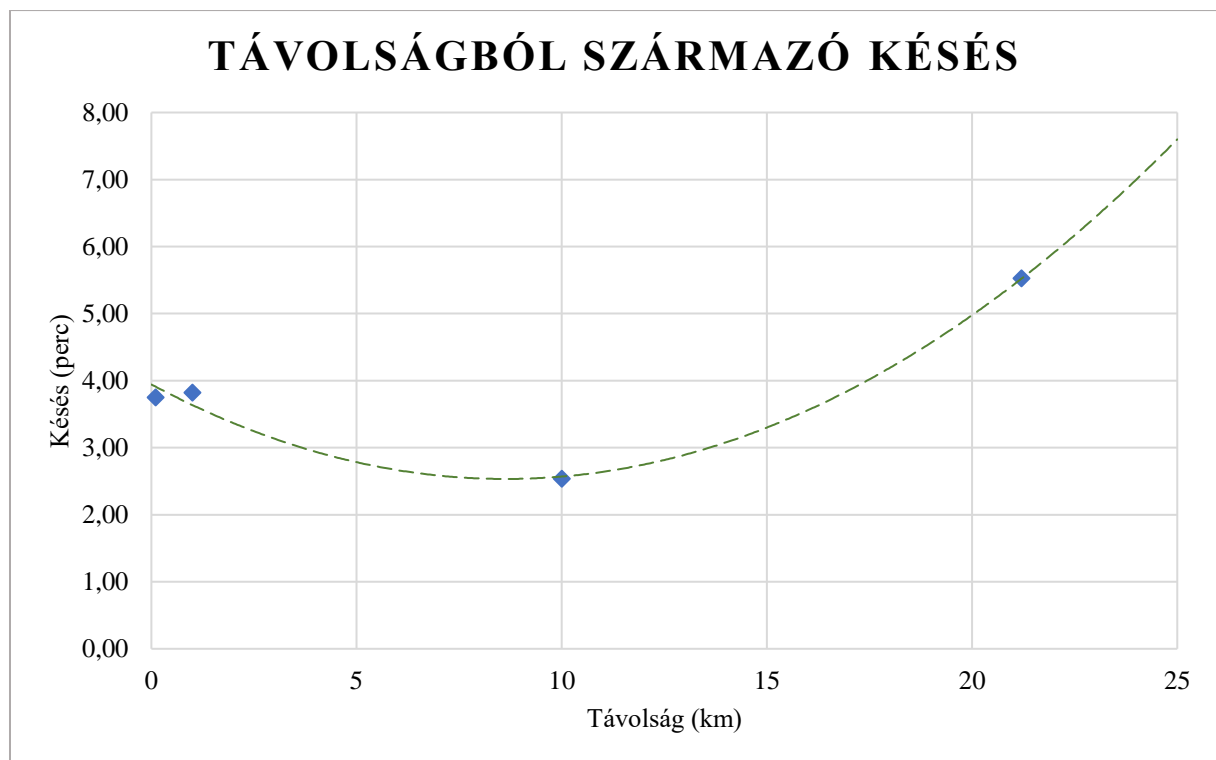
(forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)

A 6. és 7. ábra az így kialakult adatokat és a hozzájuk tartozó görbét mutatja be. A távolságból és a sebességcsökkenésből származó késési adatokat súlyozott átlagszámítással hoztam létre, mivel a nagyobb sebességcsökkenés ugyanazon a távolságon nagyobb késést eredményez, valamint ugyanazon sebességcsökkenési kategóriában a különböző távolságok arányosan különböző mértékű késéshez vezetnek.

Az így kialakult ponthalmazra az Excel trendvonal segítségével görbét illesztettem az elsődleges megállapítás alapján. A távolságból származó késés (6. ábra) esetén a feltételezett parabola majdnem tökéletesen illeszkedett az adataimra.

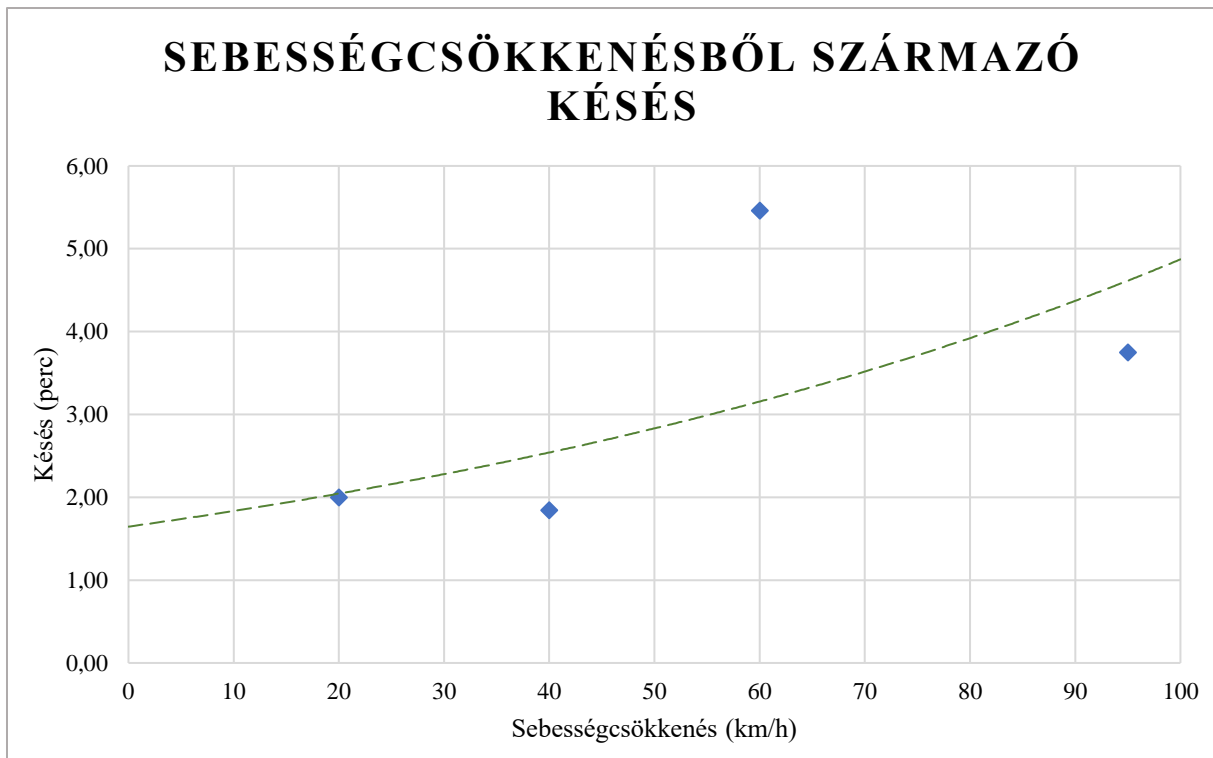
A sebességből származó késés (7. ábra) esetén kevésbé illeszkedett jól az exponenciális görbe, így ebben az esetben a különböző függvény típusokat (lineáris, parabola, exponenciális, logaritmus, hatvány) egyesével végig próbálva igyekeztem a legjobban illeszkedő függvényt megtalálni.

A pontokra illesztett görbék alapján becsülhetővé válik a különböző távolságok és sebességcsökkenések alapján a késés várható mértéke.



6. ábra: Távolságból származó késés

(forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)



7. ábra: Sebességcsökkenésből származó késés
(forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)

Az (1) egyenlettel a távolság (l) alapján határozható meg a késés mértékét egy másodfokú parabola segítségével. A (2) egyenlettel a sebességcsökkenés (Δv) mértékének tudatában egy exponenciális függvény alkalmazásával adható meg a várható késés mértékét.

$$(1) \quad T_{(l)} = 0,0189 * l^2 - 0,3266 * l + 3,9438$$

$$(2) \quad T_{(\Delta v)} = 1,6455 * e^{0,0109 * \Delta v}$$

A 6. és 7. ábra alapján a pontokra illesztett görbék egyenletei segítségével definiáltam egy összesítő egyenletet (3), amely segítségével becsülhető a késés a sebességcsökkenés mértékének és a hosszának a tudatában. Különböző megközelítést vizsgálta (pl.: átlag), ugyanakkor a két egyenlet szorzatának a gyöke adja a vizsgált megközelítések közül a legjobb közelítést. Ezáltal átlagosan +8,93 %-os eltéréssel meghatározható a késések mértéke.

$$(3) \quad T_{(l,\Delta v)} = \sqrt{(1,65 * e^{0,011 * \Delta v}) * (0,018 * l^2 - 0,33 * l + 3,94)}$$

5.3. Esettanulmány - becslési módszer alkalmazhatósága

Az eredmények alapján ellenőrzést végeztem a becslés módszer helyes működéséről, valamint megállapítást tettem, hogy milyen valószínűséggel ad helyes eredményt a késés várható értékére.

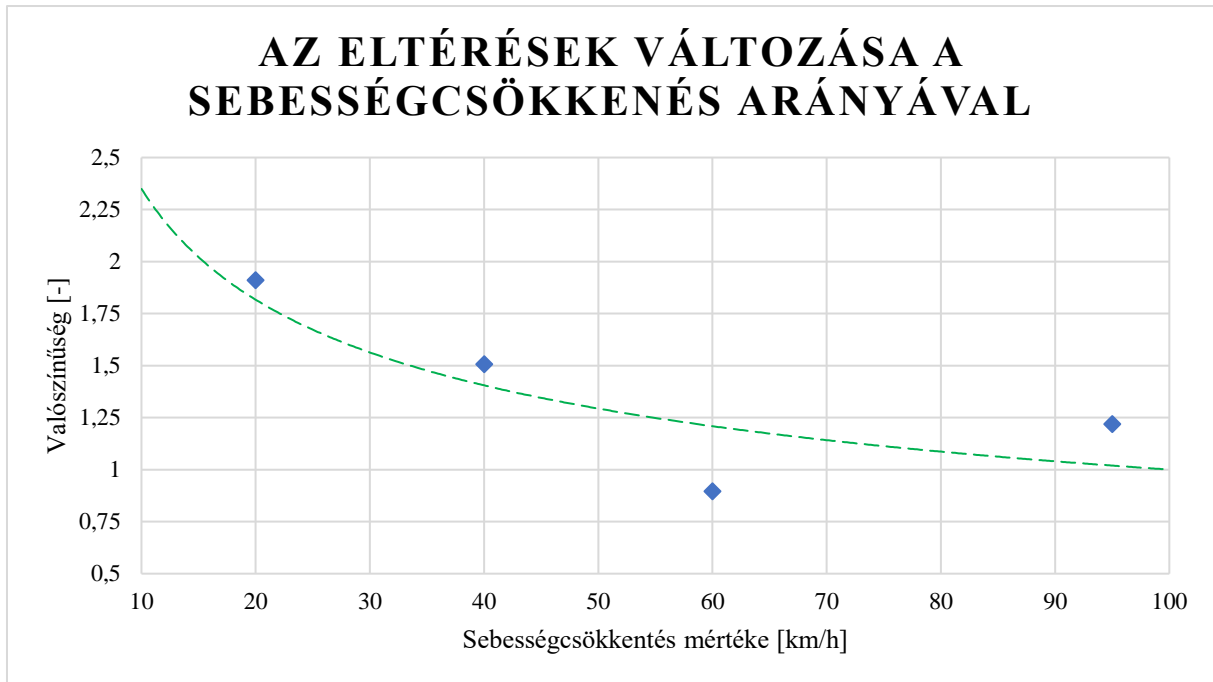
Egyrészt felhasználtam a lehatárolás során használt adatokat (30. számú vasútvonal időjárási késései), másrészt „külső” adatokat is. Az adatbázis azon vonatait vettem alapul, melyek „ideiglenes sebességkorlátozás” okból késtek, de más vonalon. Ezek a vonalak véletlenszerűen lettek kiválasztva, a cél az volt, hogy a módszer az ország számos pontján ellenőrizve legyen.

Az ellenőrzés során kiderült, hogy a módszer nem alkalmas minden sebességkorlátozásból fakadó késés becslésére, mivel számos esetben megjelentek olyan sebességcsökkentések, amelyek a menetdinamikai görbéknek a gyorsítási vagy fékezési szakaszában jelentek meg. Abban az esetben, amikor a sebességkorlátozást egy adott állomás vágányán a fékezési vagy gyorsítási szakaszban érinti a vonat, ott a legtöbb esetben 2-3-szor magasabb értéket adott az egyenlet.

Emellett azokban az esetekben, mely során adott állomásközben egymás után több különböző mértékű sebességkorlátozás jelenik meg, ott az egyenletbe nem lehet helyesen behelyettesíteni. Lehetséges megoldás lenne a problémára, hogy az egyes sebességkorlátozásokra külön-külön végzek becslést. Itt viszonyt ismét fent áll a korábbi probléma, miszerint a gyorsítási vagy fékezési szakaszban történő korlátozás becslése jelentős torzulással jár.

Az elsődleges kiindulás nehézségei miatt arra a következtetésre jutottam, hogy a módszer alkalmazhatóságának a vizsgálatára csak az időjárási késéseket vizsgálom, de figyelmet fordítva arra, hogy ne csak egy specifikus vonalon végezzem a vizsgálatot.

A módszer által jószolt késés és az adatbázisban rögzített késés hányadosa megadja, hogy milyen pontos a becslés által adott eredmény. Sebességcsökkentési kategóriánként átlagoltam az eredményeket, melynek értékeit a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra: Eltérés mértéke a sebességcsökkenés függvényében
(forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)

A pontokra illesztett görbe egy hatványgörbe, melynek egyenlete (4) alapján meghatározható, hogy a sebességcsökkenés (Δv) mértékével milyen valószínűséggel határozható meg a kérés.

$$(4) \quad P = 5,5185 * \Delta v^{-0,371}$$

Megfigyelhető, hogy minél nagyobb a sebességcsökkenés mértéke, annál pontosabb eredményt tud a módszer biztosítani.

6. Konklúzió

A kutatás során valós késési adatok elemzésével alapvető összefüggéseket azonosítottam a vasúti késések és az időjárási jellemzők között. 2022. évi adatok alapján megállapításokat tettem, hogy a különböző időjárási okok (szél, csapadék, vihar, köd) milyen következményekkel jártak és ezt hogyan befolyásolták a vonali jellemzők, mint a domborzati viszonyok, növényzeti jellemzők és a víz közelsége.

Megállapítottam, hogy az elemzett adatok közül a csúszós sínek, a felsővezeték szakadás, a hamisfoglaltság, a sorompó használhatatlansága okozta késésekkel érdemes foglalkozni. Ezek a következmények különböző időjárási jellemzők miatt következnek be és az ebből fakadó késések jó közelítéssel becsülhetőek.

Emellett a sebességkorlátozások kérdéskörét mélyebben vizsgáltam. Egy egyenletet hoztam létre, mely segítségével kis eltéréssel becsülhetőek a késések a sebességcsökkentés mértékének és a hosszának a tudatában. Az adatok elemzésével megállapítottam, hogy minél nagyobb a sebességcsökkentés mértéke, annál pontosabb eredményt tud a módszer biztosítani.

Azonban nem hagyható figyelmen kívül a kutatás során felmerült nehézségek és tanulságok sem. Egyik legnagyobb nehézség az adatgyűjtés és az adatminőség volt, hiszen az időjárással kapcsolatos számszerűsített adatok (szélsébség, hőmérséklet, csapadékmennyiség) nem álltak rendelkezésemre. Az időjárási tényezők és a vasúti késések közötti kapcsolatok elemzésében a kritikus pont az időjárási jellemzők számszerűsítése és mérhetővé tétele.

A kutatás folytatásának számos lehetősége van. Célom, hogy a jövőbeni munka során további tényezőket vonjak be a kutatásmba és a figyelembe vett tényezőket pontosabban határozom meg. Mivel az időjárási késések nem korlátozódnak egy adott régióra vagy kontinensre; ennek megfelelően a kutatások széles körű és átfogó megközelítést igényelnek.

Összefoglalva, a vasúti késések és az időjárási jellemzők közötti kapcsolatok elemzése és továbbfejlesztése kulcsfontosságú a közlekedési rendszerek hatékonyabb működése és fejlesztése szempontjából. Az időjárási tényezők számszerűsítése lehetővé teszi a vasúti késések előrejelzését, így pontosabb és hatékonyabb kezelését, ami a szolgáltatási színvonal növekedését eredményezheti.

Ábrajegyzék

1. ábra: Késő vonatok a 100-as vasútvonalon (forrás: http://vonatinfo.mav-start.hu/).....	2
2. ábra: Magyarország vasúti személyszállítási térképe (2010) (forrás: https://maps.hungaricana.hu/hu/HTITerkeptar/34539/)	10
3. ábra: 2022. évi menetrendszerűség maximum 5 perc késés esetén (forrás: https://www.mavcsoport.hu/mav-start/bemutakozas/menetrendszeruseg)	13
4. ábra: 2022. évi menetrendszerűség maximum 15 perc késés esetén (forrás: https://www.mavcsoport.hu/mav-start/bemutakozas/menetrendszeruseg)	13
5. ábra: Késések átlagos mértéke a távolság és a sebességcsökkentés függvényében (forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)	23
6. ábra: Távolságból származó késés (forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)	24
7. ábra: Sebességcsökkenésből származó késés (forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)	25
8. ábra: Eltérés mértéke a sebességcsökkenés függvényében (forrás: MÁV Zrt. adatai alapján saját elemzés)	27

Táblázatok jegyzéke

4.1. táblázat: 2022. évi menetrendszerúségi adatok feláras országos, valamint elővárosi vonatokra [%].....	11
4.2. táblázat: 2022. évi menetrendszerúségi adatok országos, valamint regionális vonatokra [%].....	12
5.1. táblázat: 2022. év vasúti késéseinek elemzése okokra bontva /1	15
5.2. táblázat: 2022. év vasúti késéseinek elemzése okokra bontva /2	16
5.3. táblázat: Késési okok összesítése [perc]	20

Irodalomjegyzék

Tudományos irodalmak

- [1] „Europe’s Rail Mission and Objectives - Europe’s Rail”. Elérés 2023. június 27. <https://rail-research.europa.eu/about-europes-rail/europes-rail-mission-and-objectives/?fbclid=IwAR000JfvLpXyQiPrZCHdM7T7rW7FVd55XsnOgDLKIHyeR-Z-a1FJNqHvDgY>
- [2] Blayac, Thierry, és Maïté Stéphan. „Are Retrospective Rail Punctuality Indicators Useful? Evidence from Users Perceptions”. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 146 (2021. április 1.): 193–213. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.013>.
- [3] Monsuur, Fredrik, Marcus Enoch, Mohammed Quddus, és Stuart Meek. „Modelling the Impact of Rail Delays on Passenger Satisfaction”. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 152 (2021. október 1.): 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.08.002>.
- [4] Brazil, William, Arthur White, Maria Nogal, Brian Caulfield, Alan O’Connor, és Craig Morton. „Weather and Rail Delays: Analysis of Metropolitan Rail in Dublin”. *Journal of Transport Geography* 59 (2017. február 1.): 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.01.008>.
- [5] Chen, Zhenhua, Yuxuan Wang, és Lei Zhou. „Predicting Weather-Induced Delays of High-Speed Rail and Aviation in China”. *Transport Policy* 101 (2021. február 1.): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.11.008>.
- [6] Zhu, Feng, Xu Wu, és Chengxuan Cao. „High-Speed Rail and Air Transport Competition under High Flight Delay Conditions in China: A Case Study of the Beijing-Shanghai Corridor”. *Utilities Policy* 71 (2021. augusztus 1.): 101233. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101233>.
- [7] Delorme, Xavier, Xavier Gandibleux, és Joaquín Rodríguez. „Stability Evaluation of a Railway Timetable at Station Level”. *European Journal of Operational Research* 195, sz. 3 (2009. június 16.): 780–90. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.062>.
- [8] Nagy Enikő, Esztergár-Kiss Domokos, Dr. Csiszár Csaba. „Késési okok vizsgálata a vasúti személyszállításban”, IFFK 2013 (2013. augusztus 28-30.)

- [9] Enikő Nagy és Csaba Csiszár. „Analysis of Delay Causes in Railway Passenger Transportation”. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 43, sz. 2 (2015. március 30.): 73–80. <https://doi.org/10.3311/PPtr.7539>.
- [10] Goverde, Rob M. P. „Railway Timetable Stability Analysis Using Max-plus System Theory”. *Transportation Research Part B: Methodological, Advanced Modelling of Train Operations in Stations and Networks*, 41, sz. 2 (2007. február 1.): 179–201. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.003>.
- [11] Xu, Jin, Weiqi Wang, Zheming Gao, Haochen Luo, és Qian Wu. „A Novel Markov Model for Near-Term Railway Delay Prediction”. *Computers & Industrial Engineering*, 2023. május 18., 109302. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109302>.
- [12] Yu, Ke, Chuiyun Kong, Limin Zhong, Junfeng Fu, és Jie Shao. „Delay Prediction with Spatial–Temporal Bi-Directional LSTM in Railway Network”. *ICT Express*, 2023. május 11. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2023.05.002>.
- [13] Zhang, Lang, Deqiang He, Yan He, Bin Liu, Yanjun Chen, és Sheng Shan. „Real-Time Energy Saving Optimization Method for Urban Rail Transit Train Timetable under Delay Condition”. *Energy* 258 (2022. november 1.): 124853. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124853>.

Egyéb irodalmak

- [14] Fruzsina Előd. „4 évet késtek a magyar vonatok tavaly”, 2019. március 7. https://index.hu/gazdasag/2019/03/07/mav_vonatok_kesese_2018/.
- [15] „Itthon: Egy év alatt 3,8 évet késtek a vonatok Magyarországon | hvg.hu”. Elérés 2023. június 27. https://hvg.hu/itthon/20190206_Egy_ev_alatt_38_evet_kestek_a_vonatok_Magyarorszagon?fbclid=IwAR0W1pXfYDbDob6gkvLBx0TDyVhh7bB1ogYk_Q9PuC-cUmmMkisiqVPoN73iU.
- [16] 24.hu. „Naponta 250 órát is késhetnek a MÁV vonatai”, 2022. október 4. <https://24.hu/tech/2022/10/04/mav-vonat-keses-adatbazis-applikacio-szoftver-programozo-fejlesztes/>.
- [17] „Van az a fal, ami meg tudja védeni a szobi vonalat?” Text. WEBAPIX Kft. Elérés 2023. október 21. <https://iho.hu/hirek/van-az-a-fal-ami-meg-tudja-vedeni-a-szobi-vonalat-190804>.