

A vágányminőségi index stratégiai alkalmazása a teljesítménymutató-alapú vasúti pályakarbantartás döntéshozatal támogatásában

Enhancing Track Maintenance Decision-Making through Strategic Use of Track Quality Index (TQI) Based on Performance Indicators

Dr. ORBÁN Zsolt László¹, COJOCARU Cezar², GUȘĂ Dan³, GOCICĂ Marius⁴, Dr. KÖLLŐ Gábor⁵

¹Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, 400363 Kolozsvár, Observatorului utca, 72-74 sz., zsolt.orban@cfdp.utcluj.ro

²Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, 400363 Kolozsvár, Observatorului utca, 72-74 sz., Cojocaru.Ni.Cezar@student.utcluj.ro

³Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, 400363 Kolozsvár, Observatorului utca, 72-74 sz., Gusa.An.Dan@student.utcluj.ro

⁴Román Állami Vasút (CNCFR SA) – Kolozsvári Vasút-igazgatóság, Kolozsvár, Avram Iancu tér, 17. sz., marius.gocica@cfr.ro,

⁵Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, 400363 Kolozsvár, Observatorului utca, 72-74 sz., gavril.kolló@cfdp.utcluj.ro

Abstract

This paper examines the strategic use of the Track Quality Index (TQI) in railway track maintenance, particularly focusing on decision support systems that are based on performance indicators. The research illustrates how aggregated TQI values and percentile-based indicators can be utilized to assess the overall health of the network, identify critical sections, and support long-term maintenance strategies. The study highlights that, in addition to aggregated indicators, analyzing individual geometric parameters is essential for determining suitable maintenance interventions. Furthermore, the paper proposes a multi-level TQI/KPI-based decision support framework, aligning with the EN 13848-6 standard and enhancing decision-making in modern asset management for track maintenance.

Keywords: Track Quality Index (TQI), key performance indicator (KPI), railway maintenance, percentile-based indicators, infrastructure management.

Kivonat

A dolgozat a vágányminőségi index (Track Quality Index -TQI) stratégiai felhasználási lehetőségeit vizsgálja a vasúti pályafenntartás területén, különös tekintettel a teljesítménymutató-alapú döntéstámogatási rendszerekre. A kutatás bemutatja, hogy az aggregált TQI-értékek és a percentilis-alapú indikátorok miként alkalmazhatók hálózati szintű állapotértékelésre, kritikus szakaszok azonosítására és hosszú távú karbantartási stratégiák támogatására. A tanulmány hangsúlyozza, hogy az aggregált indikátorok mellett az egyedi geometriai paraméterek elemzése továbbra is elengedhetetlen a megfelelő fenntartási beavatkozások meghatározásához. A dolgozat egy többszintű TQI/teljesítménymutató-alapú döntéstámogatási keretrendszert javasol, amely összhangban áll az EN 13848-6 szabvány szemléletével és támogatja a modern eszközmenedzsment-alapú pályakarbantartási döntéshozatalt.

Kulcsszavak: vágányminőségi index, teljesítménymutató-alapú döntéstámogatás, vasúti pályafenntartás, percentilis-alapú indikátorok, infrastruktúra-menedzsment.

1. BEVEZETÉS

A vasút stratégiai közlekedési eszköz, és nemzeti érdekű hálózat. Hatékony működése közvetlenül a pálya felépítményének állapotától és minőségétől függ. Ezért a karbantartás és a pálya állapotának pontos értékelése kritikus tevékenységek a vasúti infrastruktúra teljes életciklusában.

A gazdasági hatékonyság érdekében a vasúti infrastruktúrának alapvető követelményeknek kell megfelelnie. Ez összhangban van a vasúti közlekedés négy alapelvével: biztonság, kényelem, fenntarthatóság és költséghatékonyság [1]. Ebből kifolyólag az infrastruktúra minőségének alapos értékelése elengedhetetlen a közlekedési rendszer hosszú távú hatékonyságának biztosítása érdekében.

Gyakorlatban, a legtöbb vasúti adminisztráció jelentős részét a költségvetésének rendszeres és időszaki karbantartási tevékenységekre fordítja. Ez a költség akár a vasút teljes életciklusának 70%-át is elérheti [2], ami hangsúlyozza a vasútvonalak állapotának pontos értékelésének szükségességét a karbantartási munkák prioritizálása és a hálózat erőforrásainak hatékony elosztása érdekében.

A vágányminőségi index, ezutáni TQI – Track Quality Index, egy alapvető műszaki paraméter, amely jellemezi a vágány geometriájának minőségét geometriai paraméterek alapján az EN 13848 szabványsorozat szerint egy előre meghatározott hosszúságú vágányszakaszra, általában 200 m-re [3]. A legtöbb vasúti adminisztráció ezt a mutatót használja az infrastruktúra állapotának hatékony ellenőrzésére. Fontos azonban megjegyezni, hogy nincs egyetemes érvényes módszer a TQI értékelésére. A számítási módszerek és a TQI-értékek értelmezési módjai országonként jelentősen eltérnek [3].

Európában az EN 13848-6+A1 szabvány biztosítja a TQI-számításának referenciakeretét. Ugyanakkor minden ország saját szabályozásokat vezet be, hogy biztosítsa a belföldi követelményeknek való megfelelést. Romániában például a pálya-diagnosztikai járművel mért geometriai paraméterek értékelését és a TQI számítását az OMT 2256/2006 miniszteri rendelet szabályozza.

A vágány geometriai minőségének elemzésének céljai sokfélék lehetnek, és eltérő elemzési módszereket igényelnek. Az EN 13848-6+A1 szabvány azt javasolja, hogy a tervezett használatuk szerint különböző összeszerelési szintekre sorolják őket. Így háromszintű vágánygeometriai adatok összeállítása van meghatározva:

- részletes szint – tartalmazza azokat az elemzéseket, amelyek szükségesek a helyi beavatkozások, rövid távú karbantartási műveletek és működési korlátozások döntéséhez;
- közép-szint – tartalmaz elemzéseket, amelyek középtávú vágánykarbantartási és felújítási munkák tervezéséhez használhatóak;
- Általános szint – tartalmazza a hosszú távú stratégiai döntésekhez szükséges elemzéseket azáltal, hogy néhány mutatóban összefoglalja a nagy mennyiségű adatot, amelyek áttekintést nyújtanak a hálózat minden részéről.

Ha az egyes izolált hibák értékelése a legmegfelelőbb a vágánygeometria részletes szintjén történő jellemzéséhez, akkor a TQI gyakrabban használható azoknak a kulcsfontosságú mutatóknak a meghatározására, amelyek a vágánygeometria minőségét leírják a közép- és általános szinten.

2. KIHÍVÁSOK ÉS DÖNTÉSTÁMOGATÁSI LEHETŐSÉGEK A VASÚTI PÁLYAKARBANTARTÁSI ADMINISZTRÁCIÓBAN

A vasúti karbantartás egyik legnagyobb kihívása az infrastruktúra fokozatos öregedése, a megnövekedett forgalmi terhelés és bizonyos esetekben a korlátozott karbantartási erőforrások. A forgalom sebességének fenntartása a vonal tervezett sebességén, különösen a nagyobb tengelyterhelések és a nehezebb forgalom növeli a dinamikai hatást az infrastruktúrára és a felépítményre. Mindez gyorsabb geometriai romláshoz és gyakoribb karbantartási igényekhez vezet. Ugyanakkor, a vasúti infrastruktúra jelentős része elavult, és a rendelkezésre álló pénzügyi és műszaki kapacitások nem teszik lehetővé minden hibás szakasz azonnali kezelését. Ezért egyre fontosabbá válnak a prioritások alapján működő karbantartási stratégia alkalmazása és a kockázati osztályok alapján hozott döntések.

Egy másik jelentős kihívás a modern vágánygeometria mérési rendszerek és azon túli rendszerek által biztosított nagy mennyiségű adat feldolgozása és értelmezése. A vágányhibák gyakran helyiek, ezért a szórásértékek nem mindig alkalmasak a kritikus szakaszok helyes azonosítására. Emellett különböző országok eltérő módszereket alkalmaznak a TQI számítására és értelmezésére, ami megnehezíti az eredmények összehasonlítását és az együttműködést. Ezért a modern vasúti karbantartási rendszereknek nemcsak a vágánygeometriai állapotának pontos értékelését kell biztosítaniuk, hanem támogatniuk kell a hálózati szintű stratégiai tervezést, a hosszú távú rongálódás nyomon követését és a megfelelő beavatkozások kiválasztását is.

Ennek eredményeként a vágány összesített minőségi mutatója, például a TQI, és az abból származtatott mutatók egyre fontosabb szerepet kapnak. Lehetővé teszik a nagy mennyiségű geometriai adat strukturált összesítését, kritikus szakaszok gyors azonosítását és hosszú távú karbantartási stratégiák

támogatását. Azonban, önmagában az aggregált mutatók nem elegendőek a szükséges beavatkozások típusának meghatározására, ezért elengedhetetlen az egyes geometriai paraméterek részletes elemzése és azok hozzájárulásának vizsgálata az összértékhez.

A 200 méteres szakaszokra vonatkozó TQI-számítás statisztikai adatokat szolgáltat, azaz az egyes geometriai paraméterek szórását a szakasz átlagjától. Mivel ez a mutató csak az összértékű meghibásodást írja le, és nem azonosítja a pont-anomáliákat, a teljes műszaki diagnózis megköveteli a TQI alkalmazását a helyi (elszigetelt) hibák értékelésével együtt.

Bár a TQI hatékony eszközt nyújt a vágánygeometria állapotának szegmensszintű értékelésére, a kizárólag egyes szakaszokra definiált TQI-értékek nem elegendőek a hálózati szintű hosszú távú stratégiai döntések alátámasztásához. A nagy mennyiségű mérési adat, valamint a hibák térbeli és időbeli változatossága összesített, teljesítményindex-alapú (Key Performance Index, KPI) megközelítéseket igényel, amelyek gyorsan azonosítják a kritikus szakaszokat, nyomon tudják követni a degradációs trendeket és meghatározni a karbantartási prioritásokat. A percentilis alapú mutatók és a küszöbértékek alkalmazása lehetőséget ad arra, hogy a TQI nemcsak diagnosztikai eszközként, hanem stratégiai infrastruktúra-teljesítménymutatóként is használható legyen.

Az EN 13848-6 szabványban definiált referenciaértékek (TQI_{Ref}) és vágányminőségi osztályok (TQC) adaptálhatók a pálya fenntartási megközelítéséhez a teljesítménymutatók (KPI-k) alapján. A TQI_{Ref} lehetővé teszi a referencia- és célértékek meghatározását, míg a TQC osztályok hálózati szintű vágánygeometriai státusz osztályozását támogatják. Ezek az elemek jó alapot nyújtanak a stratégiai teljesítménymutatók kidolgozásához, amelyek támogatják a hosszú távú karbantartási döntéseket és a kritikus pályaszegmensek prioritizálását.

3. A TANULMÁNY CÉLJA ÉS DÖNTÉSTÁMOGATÁSI VONATKOZÁSAI

A tanulmány célja a TQI-számításon alapuló mutatók, valamint az EN 13848-6 szabványban meghatározott indikátorok alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. A kutatás arra fókuszál, hogy ezek a paraméterek miként használhatók nemcsak a vasúti vágánygeometria állapotának értékelésére, hanem stratégiai, KPI-alapú döntéstámogató eszközként is a vasúti infrastruktúra-karbantartás és az infrastruktúra-menedzsment területén. A pályaszakaszokra meghatározott TQI-értékek kiértékelését követően a tanulmány célja annak bemutatása, hogy az így nyert indikátorok hogyan integrálhatók a különböző vágánykarbantartási és fenntartási döntéshozatali folyamatokba.

A TQI-index alkalmazhatósága nagymértékben függ az alapadatok feldolgozására alkalmazott módszertől, például attól, hogy a kiértékelés maximális értékek, átlagértékek vagy percentilis alapú mutatók felhasználásával történik-e. Az alkalmazott feldolgozási módszertől függően a kapott eredmények eltérő célokat és döntéstámogató funkciókat szolgálhatnak. Ennek megfelelően a TQI-alapú indikátorok felhasználási területe a karbantartási stratégiák és munkatervek kidolgozásától egészen a pályatulajdonosok és üzemeltetők közötti szerződéses minőségfelügyeleti folyamatok támogatásáig terjedhet.

A tanulmány a hálózati szinten alkalmazott összesített TQI-értékek alkalmazását is figyelembe veszi, különös tekintettel a TQI-ből származó mutatókra. Bemutatja továbbá, hogy az összesített TQI-mutatók hogyan támogathatják a hosszú távú fenntartási stratégiák, valamint a beavatkozási és munkatervek megalapozásához. Ugyanakkor hangsúlyozza, hogy a TQI és az egyes geometriai paraméterek részletes elemzése továbbra is alapvető szerepet játszik a megfelelő karbantartási intézkedések meghatározásában és prioritizálásában.

4. A VÁGÁNY-MINŐSÉGI INDEX (TQI)

4.1. A vágány-minőségi index (TQI) meghatározása és értelmezése

Az európai szabályozási keretrendszerben a TQI meghatározása elsősorban a szórás (Standard Deviation – SD) számításán alapul. A szórás statisztikai értelemben azt fejezi ki, hogy egy adott pályaszakaszon mért geometriai értékek milyen mértékben térnek el az adott szakasz átlagértékétől. Ennek megfelelően a mutató a vágánygeometria egyenletlenségének és az ideális geometriai állapottól való eltérésének mértékét jellemzi.

Az egységes és összehasonlítható értékelés biztosítása érdekében a szabvány javasolja, hogy a TQI-számításokat 200 méter hosszúságú pályaszakaszokra végezzék el. A kiértékelés nem globálisan történik a teljes vonalszakaszra, hanem minden geometriai paraméter esetében külön-külön kerül meghatározásra. Ennek megfelelően egy 200 méteres szakaszon az alapvető vágánygeometriai paraméterek – például a

nyomtáv, a túlemelés, a siktorzulás, a süppedés és az irány – önálló elemzés tárgyát képezik. Az egyes paraméterek külön vizsgálata lehetővé teszi az adott szakaszra jellemző geometriai degradáció típusának és mértékének pontosabb azonosítását.

Bár a szórás számítási képletek az egyes európai országok szabályozásaiban kisebb eltéréseket mutathatnak, az alkalmazott módszertanok eredményei általában jól összehasonlíthatók [5]. Ez lehetőséget biztosít a vágánygeometriai állapot egységes szemléletű és hasonló elvek mentén történő értékelésére.

A romániai OMT 2256/2006 által meghatározott módszertan szerint a szórásérték számítása az alábbi képlet alapján történik:

$$AS = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \left[\sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \right]} \quad (1)$$

Az európai EN 13848-6+A1 szabványban szereplő módszer a következő képletet használja a szórás meghatározására:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Ahol n a mért paraméterre vonatkozóan az elemzett szakaszon mért adatok számát jelöli, x_i a geometriai paraméter értékét jelenti a vágány egy bizonyos pontján, és az \bar{x} a teljes szakaszon mért adatok átlagát jelenti.

4.2. Az egyedi geometriai paraméterek és az aggregált TQI kapcsolata

Amint azt korábban említettük, az egyes geometriai paraméterek szórásának meghatározása alapvetően egységes matematikai eljárás alapján, amely a különböző szabályozási rendszerekben általában hasonló eredményeket szolgáltat. A vasúti infrastruktúra-kezelők és adminisztrációk közötti lényeges különbségek elsősorban abban jelentkeznek, ahogyan ezeket az egyedi paraméterértékeket egy összesített vágányminőségi indexszé egyesítik.

Az értékelés nem korlátozódhat kizárólag az egyedi geometriai paraméterek vizsgálatára, mivel a mozgó járművek dinamikai viselkedését a vágányhibák együttes hatása befolyásolja. A különböző geometriai rendellenességek – például az irányhiba és a siktorzulás hibák egyidejű jelenléte ugyanazon pályaszakaszon – kombináltan lényegesen nagyobb hatást gyakorolhatnak a jármű–pálya kölcsönhatásra, mint az egyes hibák önállóan. Ennek következtében a pályaállapot értékeléséhez olyan összesített mutató alkalmazása szükséges, amely képes figyelembe venni és reprezentálni az eltérések kumulatív hatását a vasúti járművek futásdinamikájára és az infrastruktúra minőségére.

Ennek a követelménynek a kielégítésére az EN 13848-6 szabvány a kombinált szórás (Combined Standard Deviation – CoSD) alkalmazását javasolja. A módszer lényege, hogy az egyes geometriai paraméterek eltéréseit egyetlen összesített egyenletbe integrálja, miközben súlyozó tényezők segítségével figyelembe veszi azok relatív jelentőségét és a jármű–pálya kölcsönhatásra gyakorolt hatását. A szabvány által javasolt számítási összefüggés a következő:

$$CoSD = \sqrt{w_{\overline{AL}} SD_{\overline{AL}}^2 + w_G SD_G^2 + w_{CL} SD_{CL}^2 + w_{\overline{LL}} SD_{\overline{LL}}^2} \quad (3)$$

Ahol:

- w – az egyes geometriai paraméterek súlyozási tényezője – az értékeket az egyes i infrastruktúra-igazgatóságok határozzák meg
- SD – az egyes geometriai paraméterek szórása

Indexek: \overline{AL} – A pálya helyzete vízszintes és függőleges síkban, a bal és a jobb sín átlaga,
 G – Nyomtáv, CL – Túlemelés, \overline{LL} – Siktorzulás, a bal és a jobb sínnek átlaga.

A rendszer rugalmasságát – és egyben az európai országok közötti alkalmazási különbségek egyik fő forrását – a súlyozó tényezők jelentik. Az EN 13848-6 szabvány ezen együtthatók meghatározását az infrastruktúra-kezelők hatáskörébe utalja, lehetőséget biztosítva arra, hogy az egyes adminisztrációk saját karbantartási stratégiáiknak és üzemeltetési prioritásaiknak megfelelően kalibrálják az összesített mutatót.

Erre gyakorlati példát jelent a gépesített vágányszabályozási beavatkozások szükségességének értékelése. Ilyen esetben a nyomtávhoz tartozó súlyozási tényező nullára állítható, mivel a vágányszabályozó gépek elsősorban hossz-fekszint és irányhibák korrekciójára alkalmasak, míg a nyomtávhibák javítására nem képesek.

Annak szemléltetésére, hogy az európai szabvány által biztosított rugalmasság miként jelenik meg a gyakorlatban, érdemes megvizsgálni a romániai megközelítést az összesített TQI meghatározására. A nemzeti vasúti rendszerben alkalmazott, OMT 2256/2006 rendeletben rögzített módszertan szerint a súlyozási tényezők előre definiáltak, és valamennyi paraméter esetében 1 értéket vesznek fel [6].

Ez a műszaki megközelítés azt az alapelvet tükrözi, hogy egy pályaszakasz általános geometriai állapotának értékelése során minden egyes geometriai paraméter azonos mértékben járul hozzá a minőségromlás megítéléséhez. Ennek megfelelően az összesített indikátor az egyedi TQI-értékek egyszerű matematikai összegzésével kerül meghatározásra az alábbi összefüggés szerint:

$$TQI - Ro = \sum AS \quad (4)$$

5. A VÁGÁNYMINŐSÉG ÉRTÉKELÉSE TQI-ALAPÚ INDIKÁTOROKKAL

5.1. TQI-alapú infrastruktúra-minőségi indikátorok

A vasúti pályakarbantartási menedzsmentben a kulcsfontosságú teljesítménymutatók alkalmazásának szükségessége a vágánydiagnosztikai mérőkocsik által gyűjtött nagy mennyiségű geometriai adatból ered. Az egységes európai értékelési keretrendszer biztosítása érdekében az EN 13848-6 szabvány bevezeti a referencia TQI (TQI_{Ref}) fogalmát.

Ez a mutató a vágánygeometriai minőség jellemzésének alapvető módszereként szolgál, és elsősorban a siktorzulás, valamint a süppedés és az irány szórásértékein alapul. Bár az infrastruktúra-kezelők ettől eltérő vagy kiegészítő indexeket is alkalmazhatnak, ezeket kötelezően a referenciamódszerhez kell viszonyítani annak érdekében, hogy biztosítható legyen az eredmények összehasonlíthatósága a különböző vasúti hálózatok és nemzeti rendszerek között.

A pontos infrastruktúra-állapotértékelés egyik alapvető eleme a vágányminőségi osztályok (Track Quality Classes – TQC) meghatározása. Ezek az osztályok átfogó képet nyújtanak egy adott pályaszakasz műszaki állapotáról, és a TQI_{Ref} -értékek kumulatív gyakorisági eloszlásán alapuló statisztikai elemzés eredményeként kerülnek meghatározásra.

Az EN 13848-6 szabvány öt minőségi kategóriát definiál, amelyeket A-tól E-ig jelölnek. Az „A” osztály a legkedvezőbb, a hálózat legjobb 10%-át reprezentáló állapotot jelenti, míg az „E” osztály a legkedvezőtlenebb, legrosszabb 10%-os tartományt képviseli.

Fontos kiemelni, hogy az egyes osztályokhoz tartozó határértékek jelentősen függenek az engedélyezett üzemi sebességtől. Ennek megfelelően a szabvány külön minősítési kategóriákat határoz meg az eltérő sebességtartományok számára, a 80 km/h alatti pályaszakaszoktól egészen a 300 km/h sebességű nagysebességű vonalakig.

Az adatok hatékony kiértékelése érdekében – mind lokális, mind hálózati szintű aggregált elemzések esetén – egy adott pályaszakasz minősége többféle értékelési módszerrel jellemezhető. Az EN 13848-6 szabvány és a kapcsolódó gyakorlat alapján négy alapvető megközelítés különíthető el:

- Maximális érték: a vizsgált szakaszon előforduló legmagasabb egyedi TQI_{Ref} -értéket reprezentálja, elsősorban a kritikus geometriai hibák és beavatkozást igénylő pontok azonosítására alkalmazva;
- Átlagérték: a szakasz összes egyedi TQI_{Ref} -értékének átlagából kerül meghatározásra, és a pályaszakasz általános karbantartási állapotáról nyújt átfogó képet;
- Percentilis alapú értékelés: a kumulatív eloszlás alapján meghatározott küszöbértékek (például a 90%-os percentilis) alkalmazásán alapul, és különösen alkalmas hosszabb pályaszakaszok vagy teljes hálózatok összesített minőségének jellemzésére;
- Az előírt TQC-osztályt teljesítő szakasz aránya: azt mutatja meg, hogy a vizsgált pályahossz mekkora része felel meg egy meghatározott minimális vágányminőségi osztálynak (például a „B” osztály követelményeinek), ezáltal támogatva a szolgáltatási szint és a karbantartási célértékek értékelését.

Ezen mutatók alkalmazása nem önkényes módon történik, hanem szorosan igazodik az adott karbantartási stratégia célkitűzéseivel és az infrastruktúra-kezelési prioritásokhoz. Az optimális kiértékelési és számítási módszer kiválasztását az SR EN 13848-6 szabványban meghatározott relevancia mátrix támogatja, amely biztosítja a közvetlen kapcsolatot a vágánygeometriai mérési adatok és a vasúthálózat-menedzsment stratégiai döntéshozatali folyamatai között.

5.2. A TQI indikátorok alkalmazási területei

Az infrastruktúra-menedzsment egyik alapvető feladata annak meghatározása, hogy az adott elemzési és döntéshozatali szinthez mely indikátor-hozzárendelési és kiértékelési módszer alkalmazható a legnagyobb relevanciával. A nem megfelelő mutató vagy számítási módszer kiválasztása ugyanis torz vagy félrevezető következtetésekhez vezethet a pálya műszaki állapotának megítélése során.

Amint azt az 1. táblázat is szemlélteti, az egyes számítási módszerek alkalmazhatósága szorosan összefügg a döntéshozatal szintjével, valamint a vizsgált műszaki, üzemeltetési vagy szerződéses célkitűzésekkel. Ennek támogatására az SR EN 13848-6 szabvány relevanciaalapú osztályozási rendszert alkalmaz, amely az erősen ajánlott („++”) módszerektől egészen a nem ajánlott („--”) megközelítésekig kategorizálja az egyes értékelési eljárásokat.

TQI-ből származó teljesítménymutatók alkalmazhatósága SR EN 13848-6 szerint

1. táblázat

Alkalmazás	Maximális érték	Átlagérték	Percentilis alapú értékelés	Az előírt TQC-osztályt teljesítő szakasz aránya
Kulcsfontosságú teljesítménymutató, amelyet magas szintű karbantartási stratégiában használnak	--	+	++	++
Részletes munkaterv a pályakarbantartásra	++	++	+	+
A vágányminőséget módosító beavatkozások műszaki elfogadása	++	+	+	--
A pályaminőség szerződéses célú felügyelete az infrastruktúra-kezelő és az üzemeltető között	--	-	++	++
Szerződéses célok a vasútüzemeltetők és az infrastruktúra tulajdonosa között	--	+	+	++
A jármű tervezése a közlekedési és útminőség követelményeinek megfelelően	+	+	++	+
A jármű műszaki elfogadására szolgáló vágányszakaszok választása	+	+	++	+

A különböző teljesítménymutatók alkalmazhatóságának szemléltetése érdekében a tanulmány egy konkrét esettanulmányon keresztül vizsgálja a TQI-alapú indikátorok felhasználását. Az elemzés alapját egy 5 km hosszúságú vasúti pályaszakasz képezi, amely a romániai 300-as vasútvonalon, a Comarnic és Sinaia állomások között helyezkedik el (km 105+400 – km 110+400).

Az adatokat az EM 130 vágánygeometria-mérőkocsi szolgáltatta a 2016–2024 közötti időszakban. A vizsgálat során elemzett geometriai paraméterek közé tartozott a nyomtáv, a túlemelés, a süppedés, az irány, valamint a siktorzulás. A mérések 0,25 m-es mintavételezési lépéssel történtek, amely nagy felbontású geometriai állapotértékelést tett lehetővé

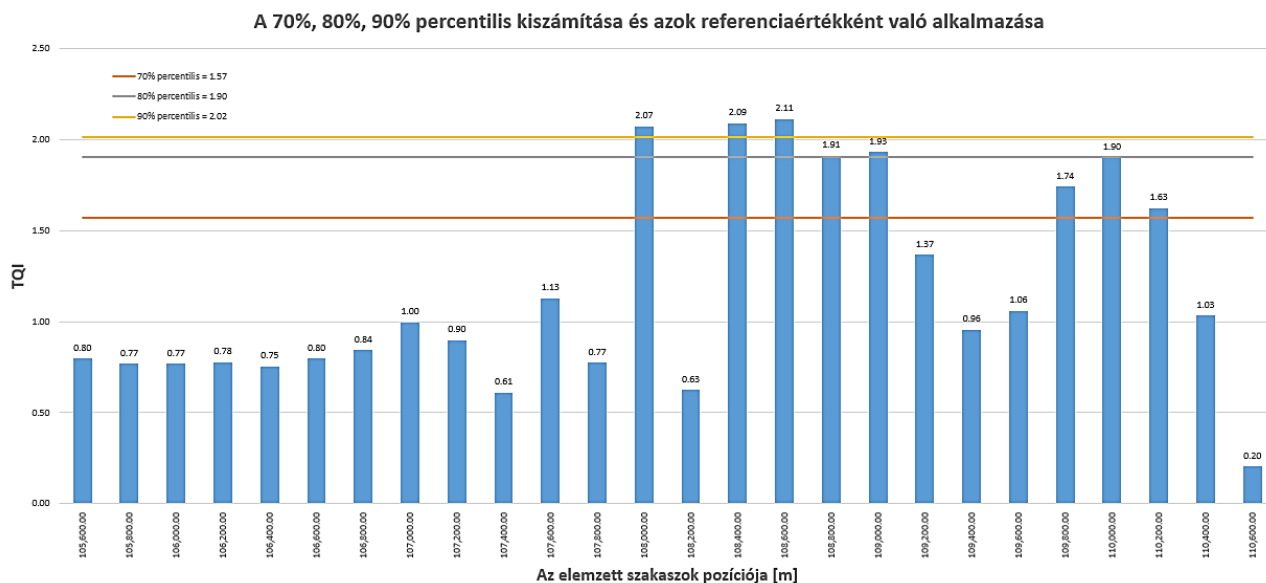
A magas szintű karbantartási stratégiák kialakítása – különösen a kulcsfontosságú teljesítménymutatók (KPI-ok) meghatározása – valamint az infrastruktúra-kezelők és üzemeltetők közötti szerződéses alapú általános minőségfelügyelet során elsősorban statisztikai alapú kiértékelési módszereket alkalmaznak. Ebben a kontextusban a TQI_{ref} -eloszlás percentilis alapú értékelése, valamint az előírt vágányminőségi osztályt (TQC) teljesítő szakaszok aránya kiemelten releváns módszernek („++”) tekinthető.

Ezek az indikátorok lehetővé teszik a nagymennyiségű vágánygeometriai adat szintetikus, aggregált mutatókká történő összegzését, ezáltal átfogó képet biztosítva a teljes vasúthálózat állapotáról. Az ilyen típusú értékelés különösen fontos a hosszú távú beruházási tervek, fenntartási stratégiák és pénzügyi döntések megalapozása szempontjából.

Ebben a megközelítésben a kizárólag átlagos vagy maximális TQI-értékeken alapuló értékeléssel szemben a percentilis alapú statisztikai elemzés képes azonosítani azon pályaszakaszok arányát, amelyek

jelentős geometriai degradációt mutatnak, amint azt az 1. ábra is szemlélteti. A módszer lehetőséget biztosít a kritikus szakaszok hatékony monitorozására, valamint támogatja a stratégiai karbantartási tervezést azáltal, hogy számszerűsíti az előre meghatározott beavatkozási küszöbértékeket meghaladó vasútvonalak arányát.

Az alkalmazott küszöbértékek meghatározása az egyes infrastruktúra-kezelők fenntartási stratégiájától, üzemeltetési prioritásaitól és rendelkezésre álló pénzügyi erőforrásaitól függ [7].

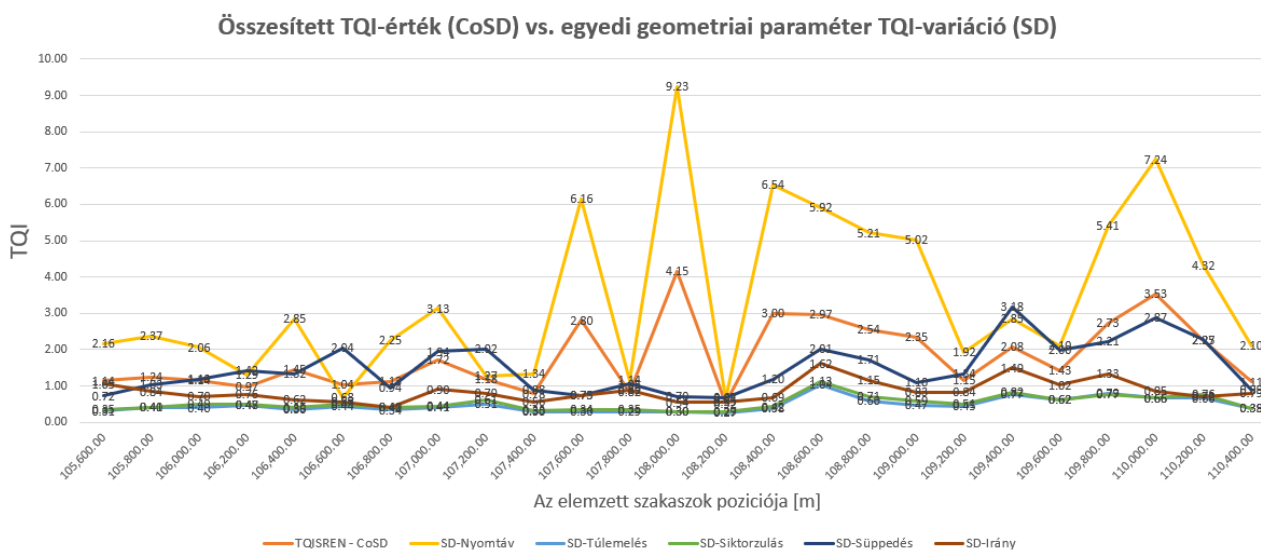


1. ábra. Percentilis alapú TQI-indikátorok alkalmazása stratégiai pályakarbantartásban

Üzemeltetési és végrehajtási szinten – különösen részletes karbantartási tervek, például gépesített vágányszabályozási munkák programozása esetén – a különböző mutatótípusok relevanciája jelentősen eltér a stratégiai szintű alkalmazásoktól. Ebben a kontextusban a TQI_{Ref} maximális és átlagértékei tekinthetők a legrelevánsabb („++”) értékelési módszereknek, mivel lehetővé teszik azoknak a pályaszakaszoknak a pontos azonosítását, ahol a geometriai állapotromlás eléri vagy meghaladja az azonnali beavatkozást igénylő küszöbértékeket.

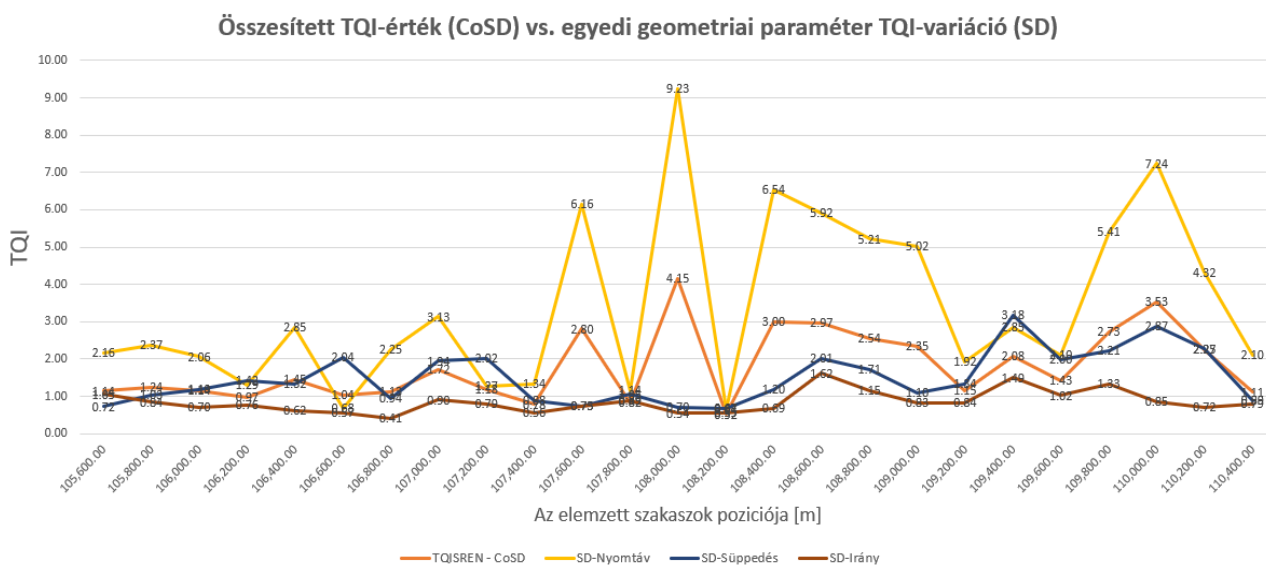
Fontos hangsúlyozni, hogy az összesített TQI helyi növekedésének értelmezéséhez önmagában nem elegendő a kombinált indikátor vizsgálata. A beavatkozás szempontjából elengedhetetlen annak meghatározása is, hogy mely geometriai paraméter – például az irány, a süppedés vagy a siktorzulás – járult hozzá legnagyobb mértékben az aggregált TQI-érték romlásához. Ennek érdekében szükséges az egyes geometriai paraméterekhez tartozó TQI-értékek külön elemzése és összehasonlítása.

A 2. ábra a vizsgált pályaszakasz összesített TQI-értékének változását szemlélteti, kiegészítve azon egyedi geometriai paraméter TQI-variációjával, amely a helyi állapotromlás elsődleges forrását képezi.



2. ábra. A TQI kulcsfontosságú indikátorként való felhasználása rövid távú karbantartási stratégiákban

A 3. ábra az összesített TQI-változást szemlélteti, összevetve azoknak a geometriai paramétereknek a TQI-variációjával, amelyek a helyi állapotromlások kialakulásához legnagyobb mértékben hozzájárulnak, és amelyekre a karbantartási beavatkozásoknak fókuszálniuk kell.



3. ábra. A TQI_{Max} kulcsfontosságú indikátorként való használata rövid távú karbantartási stratégiákban

Hasonló módon, a vágánygeometriai állapotot befolyásoló karbantartási vagy felújítási munkák műszaki átvétele során a maximális szórásérték tekinthető az egyik legfontosabb („++”) értékelési mutatónak a kivitelezési minőség megfelelőségének ellenőrzésére és a közlekedésbiztonság garantálására. A munkák átvételének kritikus szakaszában az EN 13848-6 szabvány egyértelműen hangsúlyozza, hogy a TQC százalékos alapú értékelése ebben az esetben nem ajánlott („--”).

Külön alkalmazási kategóriát képvisel a jármű-pálya kölcsönhatás vizsgálata, amely magában foglalja a gördülőállomány tervezését a vágányminőség figyelembevételével, valamint a járműengedélyezési és vizsgálati célú pályaszakaszok kiválasztását. Ebben az esetben az EN 13848-6 szabvány a percentilis alapú értékelést tekinti a legrelevánsabb („++”) módszernek.

A percentilis alapú indikátorok pontos statisztikai képet adnak azokról a geometriai viszonyokról, amelyekkel a gördülőállomány a tényleges üzemeltetés során találkozhat, ezáltal lehetővé téve a járművek dinamikai viselkedésének megbízhatóbb értékelését. Az ilyen típusú mutatók különösen fontos szerepet töltenek be a teszt- és referencia-pályaszakaszok kiválasztásában, mivel objektív módon képesek meghatározni, hogy egy adott vonalszakasz mennyire reprezentálja a valós üzemeltetési körülményeket és a kritikus geometriai állapotokat.

Ez a strukturált megközelítés rávilágít arra, hogy a vasúti infrastruktúra-menedzsment hatékonysága közvetlenül függ az adott célkitűzéshez leginkább megfelelő teljesítménymutatók helyes kiválasztásától és alkalmazásától. Míg a stratégiai szintű döntéshozatal elsősorban aggregált statisztikai eloszlásokon és hálózati szintű indikátorokon alapuló globális megközelítést igényel, addig a műszaki beavatkozások tervezése és a közlekedésbiztonság fenntartása továbbra is a minőségi indexek lokális és extrém értékeinek szigorú monitorozását követeli meg.

6. TQI-ALAPÚ DÖNTÉSTÁMOGATÁSI KERETRENDSZER A PÁLYAKARBANTARTÁSBAN

A vágánygeometriai állapot értékelésére szolgáló módszerek a karbantartási folyamatok különböző döntési szintjeit támogatják, ezért eltérő aggregációs szintű indikátorok alkalmazását igénylik. Az EN 13848-6 szabvány megközelítése szerint a geometriai adatok részletes, köztes és általános szinten egyaránt értelmezhetők és kiértékelhetők. Ennek megfelelően a TQI-alapú indikátorok nem csupán a vágánygeometria állapotdiagnosztikájára alkalmazhatók, hanem egy többszintű döntéstámogató rendszer alapvető elemeiként is szolgálhatnak. A megfelelő kulcsfontosságú teljesítménymutató (KPI) kiválasztása minden esetben az adott döntéshozatali szinttől, az elemzés időhorizontjától, valamint az alkalmazás műszaki és stratégiai céljától függ.

A javasolt keretrendszer három fő döntéshozatali szintet különböztet meg: stratégiai, taktikai és operatív szintet. A stratégiai szint elsődleges célja a hálózati szintű infrastruktúra-menedzsment támogatása, ahol az erősen aggregált indikátorok - például a percentilis alapú TQI-mutatók, a TQC-osztályeloszlások vagy a küszöbérték-túllépési arányok - lehetővé teszik a kritikus hálózati elemek gyors azonosítását, a hosszú távú állapotromlási trendek nyomon követését, valamint a beruházási és rehabilitációs prioritások meghatározását. Ezen a döntési szinten a TQI elsősorban hálózati szintű teljesítménymutatóként (KPI-ként) jelenik meg, amely támogatja az infrastruktúra-kezelők stratégiai tervezési, erőforrás-allokációs és fenntartási döntéseit

A taktikai szint a középtávú karbantartási és rehabilitációs tervezési folyamatok támogatására szolgál. Ezen a szinten az elemzés már nem korlátozódik kizárólag a szegmensszintű aggregált TQI-értékek vizsgálatára, hanem szükségessé válik az egyes geometriai paraméterek, például a nyomtáv, a hossz-fekszint, az irány, a túlemelés és a siktorzulás, részletes elemzése is. Az aggregált TQI-indikátorok alkalmasak a minőség szempontjából kritikus pályaszakaszok prioritizálására, ugyanakkor a megfelelő karbantartási vagy rehabilitációs beavatkozás meghatározásához elengedhetetlen az egyes geometriai komponensek hozzájárulásának vizsgálata. A domináns geometriai hibák azonosítása lehetővé teszi annak meghatározását, hogy az adott szakaszon milyen típusú fenntartási intézkedések, például vágányszabályozás, alkalmazása indokolt. Ennek megfelelően a taktikai szint a KPI-alapú aggregált értékelést ötvözi a részletes vágánygeometriai diagnosztikával annak érdekében, hogy támogassa a hatékony középtávú karbantartási döntéshozatalt.

Az operatív szint elsősorban a lokális geometriai hibák kezelésére, a rövid távú karbantartási beavatkozások tervezésére, valamint az üzemeltetési korlátozások meghatározására összpontosít. Ezen a döntési szinten az aggregált TQI-indikátorok szerepe háttérbe szorul, miközben a részletes vágánygeometriai adatok és az egyedi hibák elemzése válik meghatározóvá.

Az egyes geometriai rendellenességek amplitúdója, hullámhossza és térbeli eloszlása közvetlen hatással van a futásbiztonságra, a jármű-pálya kölcsönhatásra és az üzemeltetési feltételekre, ezért az operatív döntéshozatal elsősorban részletes, paraméterszintű geometriai elemzéseket igényel. Ebben a kontextusban a döntéstámogatás fő célja a kritikus hibák gyors azonosítása, a szükséges ideiglenes vagy azonnali beavatkozások meghatározása, valamint a közlekedésbiztonság fenntartása

A TQI-alapú keretrendszer jelentős alkalmazási potenciállal rendelkezik a szerződéses teljesítmény-értékelési rendszerek területén is. Az infrastruktúra-kezelők és a karbantartási szolgáltatók közötti szerződéses kapcsolatokban a TQI-, illetve TQC-alapú indikátorok, valamint a meghatározott küszöbértékeket meghaladó pályaszakaszok aránya objektív, számszerűsíthető és auditálható teljesítménymutatóként alkalmazható.

Hasonló módon, a vasúti üzemeltetők és az infrastruktúra-tulajdonosok közötti infrastruktúra-használati megállapodásokban a TQI-alapú KPI-ok közvetetten tükrözhetik a vasúthálózat működési minőségét, az utazási komfort szintjét, valamint az infrastruktúra rendelkezésre állását és üzemi megbízhatóságát. Ezáltal a TQI-indikátorok nemcsak műszaki diagnosztikai eszközként, hanem teljesítményalapú infrastruktúra-menedzsment és szerződéses minőségfelügyeleti rendszer részeként is értelmezhetők.

A bemutatott döntéstámogató modell alapvető elve, hogy a TQI-alapú indikátorok aggregációs szintjének összhangban kell állnia a támogatott döntéshozatali szinttel és annak célrendszerével. Míg a hálózati szintű stratégiai döntések elsősorban magasan aggregált, percentilis alapú KPI-ok alkalmazását igénylik, addig a részletes pályakarbantartási tervezés és az operatív beavatkozások meghatározása részletes geometriai paraméterszintű elemzéseket követel meg.

Ennek megfelelően a TQI nem csupán a vágánygeometriai állapot jellemzésére szolgáló indikátorként értelmezhető, hanem egy integrált infrastruktúra-menedzsmenti és döntéstámogatási eszközként is, amely képes összekapcsolni a stratégiai hálózati tervezést a taktikai karbantartási döntésekkel és az operatív szintű műszaki beavatkozásokkal.

7. KÖVETKEZTETÉSEK

A vasúti vágánygeometria minőségének pontos értékelése alapvető feltétele a közlekedésbiztonság garantálásának, valamint az infrastruktúra-fenntartási költségek hatékony optimalizálásának. A tanulmány rámutatott arra, hogy a modern infrastruktúra-menedzsment már nem kizárólag az elszigetelt hibák reaktív javítására épül, hanem egyre inkább globális, adatvezérelt és előrejelző elemzési megközelítéseket alkalmaz, amelyek központi eleme a Track Quality Index (TQI).

A kutatás eredményei alapján megállapítható, hogy a TQI és a hozzá kapcsolódó aggregációs, illetve értékelési módszerek rugalmassága a hagyományos műszaki diagnosztikát egy komplex és megbízható

döntéstámogató eszközzé alakítja. Az ilyen strukturált megközelítés lehetővé teszi az infrastruktúra-kezelők számára a karbantartási és rehabilitációs munkák hatékonyabb prioritizálását, a pénzügyi erőforrások optimális elosztását, valamint a vasúthálózat teljes életciklusa során a magasabb szintű üzembiztonság, megbízhatóság és szolgáltatási minőség fenntartását.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket a CFR SA részére a kutatás megvalósításához nyújtott értékes szakmai támogatásért. A vizsgált vasúti pályaszakaszra vonatkozó, az EM 130 diagnosztikai mérőkocsival végzett vágánygeometriai mérések adatainak rendelkezésre bocsátása alapvető szerepet játszott a pályaminőség-értékelési módszertanok elemzésében és összehasonlító vizsgálatában.

A biztosított adatok jelentősen hozzájárultak a kutatás eredményeinek pontosságához, megbízhatóságához és gyakorlati relevanciájához.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Sándor H., Orban Zs.L., Szántó Z., IoT și Calea Ferată – Infrastructura Viitorului?, Today Software Magazine, Nr.143, mai 2024, ISSN 2284 – 6352, p.20-23.
- [2] Abdur Rohim Boy Berawi et al., Evaluating Track Geometrical Quality Through Different Methodologies, International Journal of Technology (2010) 1: 38-47, ISSN 2086-9614, DOI:10.14716/ijtech.v1i1.35
- [3] Stefan Offenbacher, Johannes Neuhold, Peter Veit, Matthias Landgraf, Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI, Applied Sciences - November 2020, DOI: 10.3390/app10238490.
- [4] SR EN 13848-6+A1:2021, Vasúti alkalmazások. Vágány. A vágánygeometria minősége. 6. rész: A vágánygeometria-minőség jellemzése
- [5] GOCICĂ M., ORBÁN Zs.L., KÖLLŐ G., Romániai vasútvonal minőségértékelése több országra kiterjedő európai TQI szabványok alapján, XXIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia – ÉPKO / 29th International Conference on Civil Engineering and Architecture, 2025. május 29–június 1. / May 29–Jun 1, 2025, ISSN 2734-4525, ISSN-L 1843-2123, p.31-40, <https://ojs.emt.ro/EPKO/article/view/2033/2102>.
- [6] Instrucțiuni pentru diagnoza căii și a liniei de contact efectuată cu automotorul TMC, Ministerul Transporturilor, Compania Națională de Căi Ferate ”CFR” SA, Ordinul Min. nr. 2256/2006, Ed. Feroviară, 2007, ISBN 978-973-8923-01-1
- [7] Liu, Reng-Kui & Xu, Peng & Sun, Zhuang-Zhi & Zou, Ce & Sun, Quan-Xin. (2015). Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2015. 1-9. 10.1155/2015/473830.