Az entrópia közlekedésinformatikai értelmezése

Berta Tamás[1], Henézi Diána[2], Török Ádám[3]

[1] KTI – Közlekedéstudományi és Építésügyi Minőségellenőrző Intézet

[2] Széchenyi István Egyetem

[3] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék

e-mail: berta.tamas@kti.hu, kdiana@sze.hu, torok.adam@kjk.bme.hu

Kézirat benyújtva: 2026.05.31.
Kézirat elfogadva: 2026.06.29.

© Berta T., Henézi D., Török Á.

Absztrakt

Cikkünk az entrópia egységes értelmezését adja a termodinamika, a statisztikus fizika és az információelmélet területén, majd ezt a fogalmat kiterjeszti a termelési és közlekedési rendszerek elemzésére. A fizikában az entrópia az energia rendezetlenségét és eloszlását jellemzi, és a második főtétel szerint zárt rendszerekben növekszik. A statisztikus fizikában a mikroállapotok számával, míg a Shannon-féle értelmezésben a bizonytalanság mértékével azonos. Ezekre építve a tanulmány az entrópiát komplex rendszerek strukturális analógiájaként alkalmazza. A termelési rendszerekben az entrópia a veszteségek, a variabilitás és a koordinációs problémák összefoglalója, amely csak folyamatos beavatkozással csökkenthető.

A fő eredmény a közlekedési csomópontok entrópia alapú értelmezése. A csomópont entrópiája a forgalmi állapotok variabilitását és kiszámíthatatlanságát fejezi ki, míg az „entalpia" a rendszer hasznosítható potenciálját írja le. A forgalomirányítás (jelzőlámpa, szabályozás) az állapotok korlátozásával csökkenti az entrópiát és növeli a teljesítményt. Mivel a közlekedési rendszerek nyílt rendszerek, az entrópiacsökkentés csak folyamatos energia- és információbevitel mellett tartható fenn. A Shannon-entrópia formalizálja a forgalmi bizonytalanságot és hálózati szinten a koordináció mértékévé válik. A modell végül négy pillért különböztet meg (infrastruktúra, jármű, ember, információ), ahol az információ az entrópiaeloszlást átalakító tényezővé válik. Az autonóm járművek megjelenése az entrópiát az információs rétegbe koncentrálja.

Kulcsszavak: *entrópia, közlekedési rendszerek, Shannon-entrópia, forgalomirányítás, információ*

DOI: https://doi.org/10.24228/KTSZ.2026.5.3

1. BEVEZETÉS – AZ ENTRÓPIA

Az entrópia egy olyan fogalom, amelynek jelentése a tudományág függvényében kissé eltérő, de minden esetben a rendezetlenséghez, bizonytalansághoz vagy eloszláshoz kapcsolódik.

A klasszikus termodinamikában az entrópia egy állapotjelző mennyiség, amely azt fejezi ki, hogy egy fizikai rendszerben mennyire rendezett az energia eloszlása. Minél nagyobb egy rendszer entrópiája, annál „szétszórtabb" az energia és annál kevésbé alkalmas munkavégzésre. A második főtétel szerint egy zárt rendszer entrópiája időben nem csökkenhet, vagyis a természetes folyamatok iránya a nagyobb rendezetlenség felé mutat (Mahulikar et al., 2026).

A statisztikus fizikában az entrópia már mikroállapotok számához kötődik. Egy adott makroszkopikus állapot (például egy gáz adott nyomása és hőmérséklete) sokféleképpen valósulhat meg mikroszkopikus szinten. Az entrópia azt méri, hogy hány ilyen lehetséges mikroállapot tartozik az adott állapothoz. Minél többféleképp rendezhetők el a részecskék, annál nagyobb az entrópia (Wang et al., 2025).

Az információelméletben – Claude Shannon értelmezésében – az entrópia az információ bizonytalanságának mértéke. Itt nem fizikai rendezetlenségről van szó, hanem arról, hogy egy információforrás kimenete mennyire kiszámítható. Ha egy jel teljesen véletlenszerű, nagy az entrópiája; ha előre jól megjósolható, kicsi. Ez az entrópia-értelmezés fontos szerepet játszik a kommunikáció, az adatátvitel, a kódolás és a mesterséges intelligencia terén is (Zemenu et al., 2026).

Átvitt értelemben, a hétköznapi nyelvben az entrópia gyakran a káosz, a szétesés vagy a szervezetlenség metaforájaként jelenik meg, például egy szervezet, gazdaság vagy társadalmi rendszer működésének leírásakor. Itt azonban már nem egzakt mennyiségről, hanem szemléletes hasonlatról van szó.

Összefoglalva, az entrópia fizikailag az energia rendezetlenségének, statisztikailag a lehetséges állapotok számának, információelméletben pedig a bizonytalanságnak a mértéke, és közös bennük az a gondolat, hogy a természetes folyamatok során a rendszerek az „egyenletesebb", kevésbé strukturált állapotok felé tendálnak.

2. TERMELŐESZKÖZ ENTRÓPIÁJA

A rendezetlenség metaforája sokkal inkább az entrópiához kapcsolható, de itt különösen fontos az óvatosság. A fizikai entrópia nem egyszerűen „káoszt" jelent, hanem az energia eloszlásának és a mikroállapotok számának mértékét jelenti. Ha ezt átemeljük a termelésmenedzsmentbe, akkor az entrópia nem a rossz menedzsment vagy hibák puszta szinonimája, hanem a rendszerben elkerülhetetlenül megjelenő veszteségek, súrlódások, szórások és koordinációs költségek összefoglaló fogalma.

Egy termelési rendszer entrópiája analóg módon növekszik például akkor, amikor nő az átfutási idők szórása, amikor információtorzulás lép fel a döntési láncban, amikor az operátori tudás nem standardizált, vagy amikor a folyamatok közötti kapcsolatok egyre bonyolultabbá válnak. Ezek mind nem szándékosak, hanem természetes következményei az időben működő, komplex rendszereknek.

Ebből következik a kulcskérdés: átültethető-e az entrópia növekedésének törvénye a termelésmenedzsmentbe? Szigorúan fizikai értelemben természetesen nem, mert ott zárt rendszerekről, állapotjelzőkről és egzakt definíciókról van szó. Strukturális értelemben viszont igen, és ez a menedzsmentelmélet egyik mély, bár gyakran kimondatlan alapelve.

A termelési rendszerek ugyanis nem zártak, hanem nyílt rendszerek voltak. Az entrópia növekedésének törvénye itt úgy jelenik meg, hogy ha nem viszünk be folyamatosan energiát, információt és szabályozást, akkor a rendszer hatékonysága romlik! Ez nagyon pontos analógiája annak, hogy egy fizikai rendszerben csak akkor tartható fenn alacsony entrópia, ha kívülről munkát végzünk rajta.

A Lean menedzsment, a TPM, a Six Sigma, az SPC vagy akár a digitális ikrek alkalmazása mind értelmezhetők úgy, mint „entrópiacsökkentő mechanizmusok". Nem azért működnek, mert természetellenesek, hanem éppen azért, mert folyamatos energiabefektetéssel ellensúlyozzák a természetes entrópiatermelést. A standard munka, a vizuális menedzsment és a prediktív karbantartás mind olyan eszközök, amelyek csökkentik az állapotok számát, vagyis analóg módon csökkentik a „mikroállapotok" sokféleségét.

Ebből egy nagyon fontos menedzsmenttanulság következik: a rendezettség nem természetes állapot, hanem fenntartott állapot. Ugyanúgy, ahogy egy hűtőszekrény sem „magától rendezi" az energiát, hanem folyamatos munkavégzés árán, úgy egy hatékony termelési rendszer sem stabil állapot, hanem dinamikus egyensúly.

3. KÖZLEKEDÉSI CSOMÓPONT, MINT A TERMELŐESZKÖZ ENTALPIÁJA

Ez a tovább gondolás már kifejezetten rendszerszintű közlekedéstudományi és menedzsmentelméleti kérdés, és nagyon termékeny, ha következetesen analóg szinten maradunk. Ebben a keretben a közúti közlekedési csomópont valóban értelmezhető úgy, mint egy sajátos „termelő eszköz", amelynek terméke nem tárgyi javakban, hanem átbocsátóképességben, kiszámíthatóságban és biztonságban realizálódik.

Kiindulásként fontos rögzíteni, hogy egy közúti csomópontnak nincs entrópiája és entalpiája fizikai értelemben, mert nem termodinamikai rendszer. Amit viszont nagyon jól lehet csinálni, az a strukturális megfeleltetés: megvizsgálni, hogy a fogalmak milyen módon segítik megérteni a csomópont működésének romlását, a hatékonyságát és a szabályozási igényét.

A csomópont „entalpiája" ebben az analógiában nem a hőmérséklethez és nem a rendezetlenséghez, hanem a potenciálhoz kapcsolódik. Egy közlekedési csomópont kvázientalpiája felfogható úgy, mint az a teljes rendelkezésre álló „energia" és struktúrakészlet, amelyből hasznos forgalmi munkát képes végezni. Ide tartoznak a geometria, a sávkiosztás, a jelzőlámpa-program, a látótávolság, a burkolati jelek, a forgalomirányítás információs minősége, valamint a résztvevők várható viselkedése is. Egy jól tervezett, frissen optimalizált csomópont ebben az értelemben „nagy entalpiájú", mert a rendelkezésre álló struktúra nagy arányban alakítható át hasznos átbocsátóképességgé (Toth, et al., 2023).

A rendezetlenség viszont egyértelműen az entrópia analógiájához tartozik, de itt sem a hétköznapi „káosz" értelmében. A csomópont entrópiája analóg módon a lehetséges forgalmi mikroállapotok sokféleségét jelenti. Minél többféleképpen valósulhat meg ugyanaz az átlagos forgalmi állapot egymástól jelentősen eltérő sebességgel, követési távolsággal, sávváltási mintával és reakcióidőkkel, annál nagyobb a csomópont entrópiája. Egy olyan csomópont, ahol a vezetői döntések kiszámíthatók és jól korlátozottak (például egy jól megtervezett körforgalom vagy egy egyszerű, jól hangolt jelzőlámpás kereszteződés), alacsonyabb entrópiájú, mint egy geometriailag túlbonyolított, rossz felületű (Szpotowicz et al., 2024) információhiányos vagy túlterhelt csomópont.

Fontos hangsúlyozni, hogy a forgalmi torlódás nem az entrópia maximuma, hanem gyakran egy alacsony teljesítményű, de mégis strukturált állapot. A valódi „magas entrópiájú" helyzetek azok, ahol nő a sebességszórás, nő a konfliktushelyzetek száma, a döntések időben és térben szétcsúsznak, és a fajlagos kapacitás csökken. Ez nagyon hasonló ahhoz, ahogyan a termodinamikában a nagy entrópia nem feltétlenül nagy energiatartalmat, hanem rosszul hasznosítható energiát jelent.

A hőmérséklet analógiája a közlekedési csomópont esetében az intenzitás oldaláról értelmezhető. Ez nem tényleges hőmérséklet, hanem egy olyan intenzív változó, amely megmutatja, hogy egy kis „zavarás" mekkora állapotváltozást okoz. Ilyen szerepet tölthet be például a forgalomsűrűség közelítése a kapacitáshoz, az időkritikusság vagy a döntési nyomás. Egy „forró" csomóponti állapot az, ahol egy kis forgalomnövekedés vagy egyetlen hibás manőver aránytalanul nagy teljesítményromlást okoz; egy „hideg" állapot pedig az, ahol a rendszer kis zavarásokkal szemben robusztus marad.

Ebből szervesen következik a kulcskérdés: átültethető-e az entrópia növekedésének törvénye a közúti csomópontok menedzsmentjére? Fizikai törvényként természetesen nem. Viselkedési rendszerelvként viszont igen.

Egy közlekedési csomópont, ha magára hagyjuk, idővel „entrópiát termel". Változik a forgalmi összetétel, romlanak a burkolati jelek, tanulási torzulások jelennek meg a vezetőknél, nő a szabályszegések száma és a kezdetben optimális szabályozás egyre kevésbé illeszkedik a valós használathoz. Ez teljesen analóg azzal, ahogyan egy fizikai rendszerben az entrópia nő, ha nincs külső beavatkozás.

A közlekedésmenedzsment ebben a szemléletben entrópiakontroll. A forgalomtechnikai beavatkozások, a jelzőlámpa-hangolás, az adaptív szabályozás, a forgalmi információk javítása, a geometriai egyszerűsítés mind olyan „külső munkavégzések", amelyek csökkentik a lehetséges mikroállapotok számát és növelik a hasznosítható kapacitást. Fontos tanulság, hogy a „jó működés" nem stabil végállapot, hanem folyamatosan fenntartott nemegyensúlyi állapot.

Tehát ha nem kontrolláljuk a csomópontot akkor csökken az átbocsátóképessége, csökken a teljesítménye és nő az entrópiája. Ha kontrolláljuk (táblával vagy jelzőlámpával) akkor nő az átbocsátóképessége, nő a teljesítménye, nő a munkavégző-képessége és csökken az entrópiája. Érdemes egy kulcsfontosságú pontosítást hozzátenni, hogy ne keveredjenek össze a fizikai törvények és az analóg menedzsmentértelmezések.

3. 1. Kontroll nélküli csomópont

Ha egy közúti csomópontot nem kontrollálunk, akkor tipikusan a következő történik:

- az átbocsátóképesség csökken,
- a teljesítmény (átlagsebesség, megbízhatóság, biztonság) romlik,
- nő az állapotok szórása (sebesség-, követési, döntési variabilitás),
- nő a konfliktusok és mikroinstabilitások száma.

Ez analóg módon értelmezhető úgy, hogy a csomópont „entrópiája nő": egyre több lehetséges, egymástól eltérő mikroállapot valósítja meg ugyanazt a makroszkopikus forgalmi helyzetet, miközben az energia (idő, üzemanyag, figyelem) egyre rosszabb hatásfokkal alakul át hasznos forgalmi munkává.

Ez pontosan megfelel annak az intuíciónak, hogy a nem szabályozott komplex rendszerek teljesítménye idővel romlik, még akkor is, ha a külső igény (forgalomnagyság) nem változik.

3. 2. Kontrollált csomópont

Ha a csomópontot kontrolláljuk (elsőbbségi renddel, táblával, jelzőlámpával, adaptív vezérléssel), akkor valóban az ellenkezője történik:

- nő az effektív átbocsátóképesség,
- nő a teljesítmény és a kiszámíthatóság,
- nő a „munkavégző képesség" (egységnyi bemenő forgalomból több hasznos áthaladás jön létre),
- csökken a lehetséges forgalmi mikroállapotok száma.

Ez utóbbi a kulcs: a kontroll nem azért növeli a kapacitást, mert „több energiát ad" a rendszernek, hanem mert korlátozza az állapotteret. A vezetők kevesebb döntést hoznak, kevesebb variáció lehetséges, így csökken a szórás és nő a hatékonyság. Ez tökéletesen illeszkedik az entrópia analógiájához (Adeleke et al., 2023).

3. 3. „Az entrópia mindig nő" kérdésköre

A fizikai entrópianövekedés törvénye csak zárt rendszerekre érvényes. Egy közlekedési csomópont viszont nyílt rendszer: folyamatosan energiát, információt és szabályozást viszünk be kívülről.

Ezért a helyes megfogalmazás nem az, hogy „kontroll esetén csökken az entrópia, dacára annak, hogy az mindig nő", hanem inkább az, hogy a csomópont belső entrópiatermelése természetes módon fennáll, de ezt külső munkavégzéssel (kontrollal) lokálisan ellensúlyozzuk.

Ez pontosan ugyanaz a logika, mint egy hűtőszekrény esetében. A hűtő belsejében csökken a hőmérséklet és az entrópia, de csak azért, mert kívülről energiát viszünk be, és a teljes rendszer (hűtő + környezet) entrópiája összességében nő.

Ha nagyon precízen akarjuk összefoglalni, akkor a következő megfogalmazás szakmailag helyesnek bizonyul:

- Egy közúti csomópont természetes állapotában entrópiát termel, ami teljesítményromláshoz vezet.
- A forgalomtechnikai kontroll nem megszünteti ezt a tendenciát, hanem folyamatos külső erőforrás-befektetéssel ellensúlyozza.
- A kontroll hatására a csomópont lokálisan alacsonyabb entrópiájú, nagyobb munkaképességű nemegyensúlyi állapotban tartható.
- Ha a kontroll megszűnik vagy elavul, az entrópianövekedés azonnal „láthatóvá válik" teljesítménycsökkenés formájában.

A közlekedésmenedzsment ebben a szemléletben nem optimalizálási probléma, hanem entrópiakontroll-feladat. A kérdés nem az, hogy „elég-e egyszer jól megtervezni" egy csomópontot, hanem az, hogy milyen folyamatos energiabefektetéssel tartható fenn a kívánt működési szint.

Ezért helytálló az az intuíció, hogy a jó működés nem természetes, hanem fenntartott állapot.

4. A SHANNON-FÉLE ENTRÓPIA ÉRTELMEZÉSE

A Shannon-entrópia beépíthető a levezetésbe, amelyet eddig a közúti csomópont, a kontroll és az „entrópiakontroll" kapcsán felépítettünk. Sőt, ha precízek akarunk lenni, akkor azt lehet mondani, hogy amit eddig intuitív fizikai analógiaként használtunk, annak a Shannon-entrópia adja meg az információelméleti formalizmusát.

Az első kulcslépés annak felismerése, hogy a közúti csomópont nem energiát, hanem döntéseket és információt „dolgoz fel". A járművek mozgása mögött minden pillanatban döntések állnak: sebességválasztás, elsőbbségadási reakció, sávválasztás, gyorsítás vagy fékezés. Ezek a döntések nem determinisztikusak, hanem valószínűségi jellegűek. Pontosan ez az a helyzet, amelyre a Shannon-entrópia készült.

A Shannon-entrópia definíciója szerint:

$$H = -\sum_i p_i \log p_i,$$

ahol p_i az egyes lehetséges állapotok vagy kimenetek bekövetkezési valószínűsége. Ez nem hőt, nem energiát mér, hanem bizonytalanságot: mennyire nehéz megjósolni, mi fog történni.

Ha ezt egy közlekedési csomópontra alkalmazzuk, akkor az „állapotok" lehetnek például:

- járművek sorrendje az áthaladáskor,
- sávválasztási minták, konfliktushelyzetek bekövetkezése,
- átkelési idők diszkrét tartományai,
- gyorsítási–fékezési reakciók.

Egy kontrollálatlan csomópontban ezekhez az állapotokhoz tartozó valószínűségek jellemzően szétszórtak. Sokféle viselkedés közel azonos valószínűséggel fordul elő. Matematikailag ez azt jelenti, hogy a p_i eloszlás „lapos", így a Shannon-entrópia nagy. Ez nem feltétlenül látványos káoszt jelent, hanem nagyfokú előrejelezhetetlenséget. Ilyenkor ugyanaz az átlagos forgalmi terhelés egyik pillanatban még zavartalan, a következőben már konfliktusos működést eredményez.

Amikor viszont kontrollt vezetünk be – legyen az tábla, elsőbbségi rend, körforgalom vagy jelzőlámpa –, akkor információt viszünk be a rendszerbe. Fontos: nem energiát adunk hozzá, hanem döntéseket korlátozunk. A vezetők viselkedése erősen kondicionált lesz: bizonyos kimenetek (például „nem indulok el, mert piros van") nagy valószínűségűvé válnak, más kimenetek gyakorlatilag eltűnnek.

Ez Shannon-értelemben azt jelenti, hogy az eloszlás csúcsosodik, a bizonytalanság csökken, az entrópia kisebb lesz. A csomópont „viselkedése" informatívabb, előrejelezhetőbb, robusztusabb. Az átbocsátóképesség növekedése itt nem fizikai értelemben vett teljesítménynövekedés, hanem információs hatékonyságnövekedés: kevesebb döntési variációból több hasznos áthaladás realizálódik.

Ez a pont teremti meg a hidat a Shannon-entrópia és a korábbi termodinamikai analógia között. A Shannon-entrópia csökkenése lokálisan pontosan megfelel annak, amit korábban „entrópiacsökkentésnek" neveztünk. Ugyanakkor itt is érvényes az általános elv: ez csak úgy lehetséges, hogy külső erőforrásokat használunk. Jelzőlámpavezérlés, érzékelők, programozás, karbantartás, rendészeti jelenlét – mind energia- és információbefektetés. Ha ez megszűnik vagy nem frissül, a Shannon-entrópia újra nőni kezd.

A Shannon-entrópia különösen erőssé válik akkor, amikor időbeli dinamikát vizsgálunk. Egy jól hangolt jelzőlámpás csomópont esetében nem az a cél, hogy az entrópia minimális legyen, hanem hogy kontrollált szinten maradjon. Túl alacsony entrópia ugyanis merevséghez vezethet: a rendszer rosszul reagál a nem várt helyzetekre. Ez nagyon fontos felismerés modern adaptív forgalomirányításnál. Az optimális működés nem „rend", hanem strukturált bizonytalanság.

Itt válik világossá, hogy az entrópia növekedésének „törvénye" a közlekedésmenedzsmentben Shannon-értelemben így hangzik: ha nem

frissítjük folyamatosan az információt és a szabályozást, a döntési bizonytalanság nő. Ez nem morális hiba és nem tervezési kudarc, hanem a komplex, tanuló rendszerek természetes viselkedése.

5. KÖZLEKEDÉSI ALAPFOLYAMAT ÉS A SHANNON-FÉLE ENTRÓPIA ÉRTELMEZÉSE

A klasszikus fizikai és a Shannon-entrópia önmagukban nem elegendők, de jó alapot adnak egy hárompilléres közlekedési entrópiamodellhez, amelyben az infrastruktúra, a jármű és az ember külön-külön és együtt is értelmezhető.

A legfontosabb felismerés az, hogy a közlekedési rendszer entrópiája nem egyetlen skalár, hanem egy kompozit, többszintű entrópia, amelynek külön komponensei vannak. Ezek a komponensek eltérő természetűek, de ugyanarra a működési kérdésre hatnak: mennyire kiszámítható, hatékony és munkaképes a rendszer.

5. 1. Az infrastruktúra, mint strukturális entrópiaforrás

Az infrastruktúra a rendszer leglassabban változó, kvázideterminált eleme. Itt az entrópia nem elsősorban viselkedési bizonytalanságot jelent, hanem strukturális állapottérnagyságot.

Egy csomópont geometriája, sávkiosztása, láthatósága, burkolati jelei és szabályozási logikája meghatározza, hogy hányféle forgalmi mikroállapot lehetséges egyáltalán. Egy túl bonyolult geometria sok alternatív manővert tesz lehetővé, amelyek közül egyik sem domináns. Ez magas infrastruktúra-entrópiát eredményez, függetlenül attól, hogy mennyi jármű halad át rajta.

Ezzel szemben egy egyszerű, jól korlátozott infrastruktúra – például egyértelmű konfliktuspontokkal és irányokkal – csökkenti a lehetséges állapotok számát, így már szerkezeti szinten alacsonyabb entrópiát hoz létre. Fontos, hogy ez nem merevséget, hanem előre meghatározott szabadsági fokokat jelent.

Ez a komponens nevezhető strukturális entrópiának, amely a rendszer „geometriai és szabályozási szabadságfokait” méri.

5. 2. A jármű, mint dinamikai entrópiaforrás

A jármű a rendszer közepes időléptékű, részben determinisztikus, részben sztochasztikus eleme. Itt az entrópia elsősorban dinamikai variabilitásként értelmezhető.

Különböző járművek eltérő gyorsulási képességgel, fékutakkal, méretekkel, automatizáltsági szintekkel és reakcióprofilokkal rendelkeznek. Ezek a különbségek szórást visznek a rendszerbe, még akkor is, ha az infrastruktúra és a szabályozás azonos.

Egy homogén járműállomány – például hasonló teljesítményű személygépkocsik – alacsonyabb járműentrópiát eredményez. Egy heterogén flotta – kerékpár, autóbusz, tehergépjármű, személyautó, mikromobilitás – viszont jelentősen növeli a dinamikai állapotok számát. Itt nem a járművek száma a döntő, hanem a dinamikai válaszaik különbözősége.

Ez a komponens értelmezhető sebesség, gyorsulás és reakcióidő-eloszlások Shannon-entrópiájaként, vagyis tisztán információelméleti alapon.

5. 3. Az ember, mint kognitív entrópiaforrás

Az ember a rendszer leggyorsabban változó, legsztochasztikusabb eleme, és egyben a legnagyobb entrópiatermelő. Itt az entrópia nem fizikai vagy pusztán információs, hanem kognitív és viselkedési bizonytalanság.

A vezető vagy utas figyelme, tapasztalata, stresszszintje, kulturális mintái és pillanatnyi döntési stratégiái drasztikusan befolyásolják, hogy egy adott helyzetből milyen kimenet valósul meg. Még azonos jármű és infrastruktúra mellett is az emberi döntések szórása adja a legnagyobb bizonytalanságot (Pauer et al., 2019).

Ez a komponens már nem írható le klasszikus Shannon-entrópiával önmagában, mert a döntések nem függetlenek, hanem tanulás, várakozás és torzítás befolyásolja őket. Emiatt itt célszerű bevezetni a kondicionált entrópia és a kölcsönös információ fogalmát.

A forgalmi szabályozás, jelzések és táblák ebben az értelemben nem csak korlátoznak, hanem kognitív entrópiát csökkentenek. Kevesebb értelmezési szabadság miatt kisebb a döntési állapottér, ami kevesebb bizonytalanságot eredményez.

5. 4. A kibővítés kulcsa: többdimenziós entrópia

A három pillér miatt a közlekedési entrópiát nem lehet egyetlen skálán értelmezni. Ehelyett egy összetett entrópiavektorról érdemes beszélni:

- strukturális (infrastruktúra),
- dinamikai (jármű),
- kognitív (ember).

Ezek nem egyszerűen összeadódnak, hanem egymásra hatnak. Egy alacsony infrastruktúra-entrópiájú csomópont képes jelentős kognitív entrópiát „elnyelni", míg egy bonyolult csomópont már kis emberi szórástól is instabillá válik. Ugyanez igaz a járműpark homogenitására is.

Ezért kell kibővíteni az entrópia fogalmát a közlekedésben kölcsönös információval: mennyire „érti" egymást az infrastruktúra, a jármű és az ember. Egy jó rendszerben nagy a kölcsönös információ, vagyis az egyik pillér állapota erősen meghatározza a másik viselkedését. Ez csökkenti a teljes bizonytalanságot.

5. 5. Shanon-féle entrópia közlekedési csomópontra alkalmazott értelmezése

A hárompillérű közlekedési rendszer entrópiája tehát nem káoszt jelent, és nem is pusztán rendezetlenséget. Inkább azt fejezi ki, hogy mennyi szabadságfok marad kontrollálatlanul a rendszerben strukturális, dinamikai és kognitív szinten.

A közlekedésmenedzsment feladata ebben a keretben nem az entrópia megszüntetése – az lehetetlen –, hanem annak elosztása és irányítása a három pillér között. A jó rendszer ott enged szabadságot, ahol az nem romboló, és ott korlátoz, ahol a bizonytalanság gyorsan teljesítményvesztéssé válik.

6. KÖZLEKEDÉSI INFORMÁCIÓ, MINT NEGYEDIK PILLÉR

Az információ értelmezhető negyedik pillérként, de csak akkor, ha nem az infrastruktúra, jármű és ember puszta kiterjesztéseként, hanem strukturálisan új minőségként kezeljük. Valójában az információ nem egyszerűen „több adat", hanem olyan aktív elem, amely képes a másik három pillér entrópiaszintjét átalakítani, újraelosztani vagy felerősíteni. Ettől válik jogosulttá arra, hogy önálló pillér legyen.

A klasszikus hárompillérű modellben az infrastruktúra a fizikai korlátokat, a jármű a dinamika fizikai megvalósítását, az ember pedig a döntéshozatalt és a bizonytalanságot képviseli. Az információs forradalommal azonban megjelent egy olyan elem, amely nem csak passzívan leírja a rendszert, hanem visszacsatolva alakítja is.

Az információ pillérsége akkor érthető meg igazán, ha az entrópia fogalmához kötjük vissza. A Shannon-entrópia alapvetően azt méri, mennyire bizonytalan egy rendszer kimenete. A Big Data korában az történik, hogy a rendszer a saját állapotairól egyre pontosabb, egyre gyorsabb és egyre nagyobb felbontású képet kap. Ez önmagában még nem csökkenti az entrópiát – sőt, nyers adatként gyakran növeli –, de lehetővé teszi az entrópia célzott szabályozását.

Ebben az értelemben az információ metapillér: nem új fizikai szereplő, hanem a másik három pillér fölött működő szabályozó réteg. Az infrastruktúra entrópiája csökkenthető például adaptív jelzőlámpákkal, valós idejű forgalomfigyeléssel és prediktív karbantartással. Ezek mind információvezérelt eszközök. A geometria önmagában nem változik, de az aktuális állapottér ténylegesen beszűkül, mert az információ alapján a rendszer preferált útvonalakat és időablakokat hoz létre.

A járművek esetében az információ még látványosabban válik önálló tényezővé. A járműdinamika entrópiája csökken, amikor a jármű nem csak „reagál", hanem előre tud. V2X kommunikáció, kooperatív adaptív tempomat, platooning vagy autonóm funkciók mind azt jelentik, hogy a jármű viselkedése nem izolált mikroállapot, hanem információval korrelált állapot. Matematikailag ez a kölcsönös

információ növekedését jelenti a járművek között, ami a teljes rendszer Shannon-entrópiáját csökkenti, még akkor is, ha a járművek száma vagy heterogenitása nem változik.

Az emberi pillér esetében az információ szerepe a legérzékenyebb. Az ember kognitív entrópiája nem egyszerűen a „nem tudásból" fakad, hanem abból, hogy túl sok, rosszul strukturált vagy nem konzisztens információ áll rendelkezésre. A Big Data önmagában itt kifejezetten entrópiatermelő lehet. Akkor válik entrópiacsökkentővé, ha az információ döntéssé alakított, időben releváns és értelmezhető formában jelenik meg. Navigációs rendszerek, valós idejű utastájékoztatás, torlódáselőrejelzés vagy dinamikus sebességajánlások mind a kognitív állapottér szűkítését szolgálják. Kevesebb lehetséges döntés marad „értelmesnek", így csökken az emberi viselkedés bizonytalansága.

Innen nézve az információ nem egyszerűen negyedik pillér, hanem entrópiatranszformátor. Nem az a szerepe, hogy mindenhol csökkentse az entrópiát, hanem hogy átalakítsa annak térbeli, időbeli és szereplők közötti eloszlását. Egy jól informált rendszerben például magasabb lehet a lokális entrópia (sok alternatív útvonal), miközben az aggregált teljesítmény stabil marad, mert az információ korrelálja a döntéseket.

Ez egy nagyon fontos elméleti következményhez vezet: a modern közlekedési rendszer már nem írható le pusztán fizikai és viselkedési elemekkel. Információ nélkül a rendszer nyílt, de „vak"; információval viszont önreflexív és adaptív lesz. Ez minőségileg új rendszerosztály, amelyre a klasszikus hárompillérmodell már nem teljes.

Ezért a legpontosabb megfogalmazás az, hogy a közlekedési alapfolyamat négy pillére ma már az infrastruktúra, a jármű, az ember és az információ, ahol az információ nem egy újabb komponens a sor végén, hanem a másik három közötti kapcsolatok entrópiáját szabályozó réteg. Enélkül az információs forradalom nem értelmezhető, és nélküle az entrópia fogalma is csak részben alkalmazható a modern közlekedésmenedzsmentre.

7. KITEKINTÉS – ÖNVEZETŐ JÁRMŰVEK

Az önvezető gépjármű megjelenése nem egyszerű technológiai fejlesztés, hanem rendszerszintű fázisváltás a közlekedésben. Nem egyetlen pillért módosít, hanem mind a négyet egyszerre, miközben az entrópia fogalma új értelmezési szintre lép. A legfontosabb következmény az, hogy az entrópia nem pusztán csökken vagy nő, hanem struktúrát vált és áthelyeződik a rendszer egyes rétegei között.

7. 1. Infrastruktúra: fizikai entrópia csökkenése, információs függés növekedése

Az önvezető jármű radikálisan csökkenti az infrastruktúra által szükségessé tett kényszerstruktúrát. Az emberi vezetéshez kialakított infrastruktúra célja hagyományosan a kognitív entrópia csökkentése volt: széles sávok, nagy sugarú ívek, erős vizuális jelek, redundáns biztonság.

Autonóm járművek esetén az infrastruktúra:

- kevésbé „magyarázó",
- inkább precíz és digitálisan értelmezhető,
- sokszor egyszerűbb geometriájú.

Ez csökkenti a strukturális entrópiát, mert kevesebb fizikai mikroállapot marad releváns. Ugyanakkor nő a függés a digitális infrastruktúrától (szenzorok, térképek, V2I kommunikáció), ami azt jelenti, hogy a fizikai entrópia csökkenése nem abszolút, hanem átadja a komplexitást az információs rétegnek.

7. 2. Jármű: dinamikai entrópia drasztikus csökkenése

A járművek szintjén történik az egyik legnagyobb változás. Az önvezető jármű:

- gyorsabban reagál,
- determinisztikusabb,
- repetitív és tanult optimalizációkat végez,
- kommunikál más járművekkel.

Ez azt eredményezi, hogy a járműdinamika eloszlásai beszűkülnek. A sebesség-, gyorsulás- és követési profilok homogenizálódnak (Ghadi, 2024). Shannon-értelemben ez a dinamikai entrópia látványos csökkenése.

Ez az oka annak, hogy autonóm flották esetén már kis penetráció mellett is:

- nő a kapacitás,
- csökken a torlódási instabilitás,
- kiegyenlítettebbé válik a forgalom.

Ugyanakkor fontos, hogy ez a csökkenés csak akkor stabil, ha a járművek közötti információs kapcsolat fennáll. Ha megszakad, a rendszer entrópiája ugrásszerűen nőhet.

7. 3. Ember: kognitív entrópia áthelyeződése, nem eltűnése várható

Az önvezető jármű nem eltünteti az embert, hanem kiveszi a valós idejű kontrollból. Ez kulcsfontosságú különbség.

A vezetési döntések eltűnésével:

- a klasszikus kognitív entrópia (reakcióidő, stressz, figyelmetlenség) jelentősen csökken,
- de megjelenik egy új típusú bizonytalanság: a rendszerbe vetett bizalom entrópiája.

Az ember már nem mikrodöntéseket hoz, hanem:

- elfogadja vagy elutasítja az automatika döntéseit,
- stratégiai szinten avatkozik be,
- kivételes helyzetekben lép közbe.

Ez azt jelenti, hogy az entrópia időben és funkcióban átrendeződik: kevesebb, de kritikusabb döntés marad. A rendszer hatékonysága nő, de a ritka hibák hatása sokszorosára nő. Ezért az emberi entrópia nem tűnik el, hanem magasabb absztrakciós szintre kerül.

7. 4. Információ: domináns pillérré válik

Az önvezetés világában az információ nem negyedik a sorban, hanem elsődlegessé válik.

A rendszer működése attól függ:

- mennyire pontos az érzékelés,
- mennyire konzisztens a digitális térkép,
- mennyire gyors a kommunikáció,
- mennyire jók az előrejelző modellek.

Shannon-értelemben ez azt jelenti, hogy a rendszer teljes entrópiája az információs réteghez kötődik. Ha az információ minősége magas, a teljes rendszer entrópiája alacsony marad. Ha az információ zajossá válik, hiányos vagy ellentmondásos, akkor az entrópia robbanásszerűen nő, függetlenül attól, hogy a jármű mennyire „okos” (Török et al., 2020).

Ezért válik az információ nem csak pillérré, hanem sebezhetőségi ponttá.

7. 5. Az entrópia új értelmezése: nem csökken, hanem centralizálódik

A legfontosabb rendszerelméleti következtetés a következő:

Az önvezető közlekedési rendszerben az entrópia nem eltűnik, hanem centralizálódik, kondicionálódik és időben koncentrálódik:

- Kevesebb a mindennapi, kis hiba.
- Több a ritka, de potenciálisan rendszerszintű hiba.
- A bizonytalanság a peremekről a központi információs rétegbe tolódik.

Ez azt jelenti, hogy a rendszer átlagosan stabilabb, de kritikusan függ az információ integritásától.

7. 6. Végső szintézis

Az önvezető gépjármű a négy pillért nem önállóan alakítja át, hanem összekapcsolja azokat. Az infrastruktúra egyszerűbbé, a jármű determinisztikusabbá, az ember absztraktabb szerepűvé válik, miközben az információ fejlődik a rendszer „termodinamikai magjává”.

Az entrópia nem szűnik meg, hanem:

- kevesebb helyen jelenik meg,
- nagyobb súllyal koncentrálódik,
- és csak folyamatos információs munkavégzéssel tartható kordában.

Ezért az autonóm közlekedés nem az entrópia legyőzése, hanem egy újfajta entrópiamenedzsment paradigma. Ez az a pont, ahol a közlekedéstechnika, az irányítástechnika és az információelmélet végleg egyesül.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Adeleke, O. O., Oguntayo, D. O., Ayobami, I. T., Ogunkunbi, G. A. (2023) „Improving Traffic Flow in Emerging Cities: A SIDRA Intersection Based Traffic Signal Design", Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 51(2), pp. 166–171. DOI: https://doi.org/10.3311/PPtr.18018

Ghadi, M. (2024) „A Grid-based Framework for Managing Autonomous Vehicles' Movement at Intersections", Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 52(3), pp. 235–245. DOI: https://doi.org/10.3311/PPtr.24397

Mahulikar, S. P., Erkoreka, A. (2026) Self-organised and disorganised dissipative structures as energy-entropy pumps. BioSystems, 266, 105834. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2026.105834

Pauer, G., Sipos, T., Török, Á. (2019) Statistical analysis of the effects of disruptive factors of driving in simulated environment. Transport, 34(1), pp. 1-8. DOI: https://doi.org/10.3846/transport.2019.6724

Szpotowicz, R., Tóth, C. (2024) Reducing Energy Demand in Concrete Pavements by the Use of Blended Cements. Acta Technica Jaurinensis, 17(3), pp. 118–129. DOI: https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00749

Toth, C., Petho, L., Rosta, S., Primusz, P. (2023) Performance assessment of full depth asphalt pavements manufactured with high recycled asphalt pavement content. Acta Technica Jaurinensis, 16(1), pp. 18–26. DOI: https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00688

Török, Á., Szalay, Z., Uti, G., Verebélyi, B. (2020) Rerepresenting autonomated vehicles in a macroscopic transportation model. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 48(3), pp. 269-275. DOI: https://doi.org/10.3311/PPtr.13989

Wang, S., Xiao, H., Zhan, L. (2025) On the statistical physics and thermodynamics of polymer networks: An Eulerian theory for entropic elasticity. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 206(A), 106382. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmps.2025.106382

Zemenu, B., Getahun, E., Alemayehu, S., Jothimani, M. (2026) Modeling Urban Expansions and its Environmental Effects in Arba Minch City, Southern Ethiopia Using GIS, Remote Sensing, and Shannon Entropy. Scientific African, 31, e03251. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2026.e03251



Interpretation of Entropy in Transport Informatics

Keywords: entropy, transport systems, Shannon entropy, traffic control, information systems

The document develops a unified interpretation of entropy across thermodynamics, statistical physics, and information theory, and extends these concepts to production systems and transportation networks. In physics, entropy quantifies the dispersion of energy and follows the second law, which states that natural processes increase total entropy. In statistical mechanics, it reflects the number of possible microstates, whereas in Shannon's framework, it quantifies information uncertainty. Building on these definitions, the paper introduces entropy as an analytical metaphor for complex engineered systems. In production systems, entropy represents unavoidable variability, losses, and coordination inefficiencies that must be counterbalanced by continuous managerial intervention, such as Lean or Six Sigma practices. The core contribution is the interpretation of road intersections and transport systems as "entropy-controlled" systems. A traffic node's entropy corresponds to the variability and unpredictability of traffic states, while its "enthalpy" reflects its structural and operational potential. Control mechanisms (signals, signs, adaptive systems) reduce entropy by constraining the set of possible states and increasing predictability. However, since transport systems are open systems, entropy reduction is only local and requires continuous external input (energy, information, regulation).

The framework is further expanded by using Shannon entropy to formalise traffic uncertainty and extends to network-level analysis, where entropy serves as a measure of system-wide coordination. Finally, a four-pillar model (infrastructure, vehicles, humans, information) is proposed, highlighting information as an entropy-transforming layer. Autonomous vehicles shift entropy toward the information domain, making system stability highly dependent on data quality and communication.