

Bodnár László,¹ Érczes Gergő,² Rácz Sándor³

A legjellemzőbb erdőtűzterjedési modellek áttekintő vizsgálata és elemzése

A Review and Analysis of the Most Characteristic Wildfire Spread Models

Absztrakt

Az erdőtűzterjedés az erdőtűzkockázat egyik központi eleme, hiszen meghatározza a tűz kiterjedését, a tűzveszélyt és a védekezési lehetőségeket is. A tűzterjedés alapját az elemi tűzformák adják, amelyek könnyen számíthatók. A tűzterjedés vizsgálata arra irányul, hogy a tűzfront milyen gyorsan halad az éghető anyag, az időjárási tényezők és a domborzat függvényében. A terjedési sebességgel szoros összefüggésben áll a tűzintenzitás, amely a tűzfront mentén felszabaduló energia mennyiségét fejezi ki, és gyakran a Byram-féle tűzfrontvonal-intenzitás segítségével számítják. A tűzintenzitás alapján következtetni lehet a lánghosszra, a hőterhelésre és a tűzoltási lehetőségekre. Az erdőtűzek hatásai azonban nem korlátozódnak csak és kizárólag a természetes környezetre, hanem gyakran érintik az épített környezetet is. Ennek értékelésére szolgál az épületkár-potenciál számításának vizsgálata, amely a tűzveszélyt az épületek kitettségével és sérülékenységgel kapcsolja össze. Az épületkár-potenciál különösen az erdőhöz közeli lakott területek mentén jelentős. A cikk a fentiekben megfogalmazott, az erdőtűzterjedés szempontjából fontos tényezőket vizsgálja a releváns, nemzetközi szinten is elfogadott erdőtűzterjedési modellek segítségével. A cikk eredményeként nemcsak a modellek, hanem a tűzterjedésre vonatkozó számítási metódusok is megismerhetővé válnak.

Kulcsszavak: erdőtűz, tűzterjedés, elemi tűzforma, tűzintenzitás, épületkár-potenciál

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Rendészettudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Tűzvédelmi Mérnöki Tanszék, e-mail: bodnar.laszlo@uni-nke.hu

² Nemzeti Közszolgálati Egyetem Rendészettudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Tűzvédelmi Mérnöki Tanszék, e-mail: erczes.gergo@uni-nke.hu

³ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Rendészettudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Tűzvédelmi és Mentésirányítási Tanszék, e-mail: racz.sandor@uni-nke.hu

Abstract

Wildfire spread is one of the central issues in wildfire risk assessment, as it determines the spatial extent of the fire, the level of fire hazard, and the available options for suppression and mitigation. The basis of wildfire spread analysis lies in the elementary fire types, which can be described and quantified with relative simplicity. The study of fire spread focuses on the rate at which the fire front advances as a function of available fuels, meteorological conditions, and topography. Closely related to the rate of spread is fire intensity, which expresses the amount of energy released along the fire front and is commonly calculated using the Byram fire line intensity. Fire intensity provides a basis for estimating flame length, heat flux, and the feasibility of direct firefighting operations. However, the impacts of wildfires are not limited exclusively to the natural environment, as they frequently affect the built environment as well. The assessment of these impacts is addressed through the calculation of building loss potential, which integrates fire hazard with the exposure and vulnerability of structures. Building loss potential is of particular importance in residential areas located in close proximity to forested lands. This study systematically investigates the key factors identified as critically influencing wildfire spread by applying relevant and internationally established wildfire spread models. Beyond a comparative evaluation of these models, the paper also provides a detailed examination of the underlying computational approaches employed to quantify and predict fire propagation dynamics.

Keywords: wildfire, fire spread, elementary fire types, fire intensity, building loss potential

Bevezetés

Az erdőtűzek világszerte egyre komolyabb kihívást jelentenek, hiszen súlyos ökológiai, gazdasági és társadalmi következményekkel járhatnak.⁴ Kialakulásuk és intenzitásuk a világ számos területén (így Magyarországon is) növekvő tendenciát mutat, amelyet az éghajlatváltozás, a szélsőséges időjárási események és a földhasználat változásai egyaránt erősítenek.⁵ Az erdőtűzek nemcsak az erdei ökoszisztéma pusztulását idézhetik elő, hanem jelentős károkat okozhatnak az épített környezetben is, ezzel is veszélyeztetve az emberi életet és az anyagi javakat. A tűzterjedés mint folyamat kockázatos, a gyors tűzterjedés rövid idő alatt nagy területeket érinthet. A tűzterjedés sebessége és iránya gyakran nehezen számítható ki, hiszen azt az éghető anyag tulajdonságai,⁶ az időjárási tényezők és a domborzat együttesen határozzák meg.⁷ A gyors tűzterjedés növeli a tűzintenzitást és a hőterhelést, valamint csökkenti a hatékony beavatkozás lehetőségeit is.⁸ A nem kontrollált erdőtűzterjedés különösen az erdőhöz közeli lakott területeken (*wildland-urban interface*, WUI) jelent veszélyt, ahol az épített környezet az erdőszegély mentén helyezkedik el. Az erdőtűzekhez kapcsolódó kockázatok kezelése

⁴ RESTÁS 2020; DEBRECENI 2023.

⁵ TEKNŐS-KÓRÓDI 2016.

⁶ XU et al. 2018.

⁷ NAGY 2008.

⁸ SEREG-KEREKES-ELEK 2019.

ezért megbízható előrejelzési és értékelési módszereket igényel.⁹ Az erdőtűzveszély és a tűzterjedés megértése alapvető feltétele a hatékony tűz megelőzésnek és a sikeres oltásnak. Ennek hiányában az erdőtűzek hatásai súlyosabbak, illetve hosszú távon jelentős társadalmi és környezeti károkat is okozhatnak. Az erdőtűzterjedés témakörében jelen cikk célja bemutatni és matematikailag is igazolni az elemi tűzformákat, a tűzterjedés sebességét, a tűzintenzitást, illetve az épületkár-potenciál tűzvédelmi vonatkozásait. Ez a kutatás hazánkban eddig meglehetősen hiányos, holott a tűzkockázat értékelése erdészeti, tűzvédelmi és nemzetgazdasági szempontból is érdekes. A kutatási célok elérése érdekében összegyűjtöttük a téma releváns szakirodalmának hazai és nemzetközi tapasztalatait, valamint a kutatás során alkalmaztuk a mesterséges intelligencia adta lehetőségeket is. A GPT-5.1-es változatát használtuk a teljes szöveget érintően elsősorban táblázatok készítésére, írott szöveg pontosítására és szakirodalom keresésére. A vizsgált témát matematikai számításokkal is alátámasztottuk, emellett felhasználtuk saját eddigi tapasztalatainkat, amelyeket a témában hiteles szakértők¹⁰ véleményeivel is kiegészítettünk.

Kutatásunkat az elemi tűzformák vizsgálatával kezdjük, amely megalapozza a tűzterjedés formáját. Ezt követően a kialakult tűzfront sebességét elemezzük, annak érdekében, hogy megállapítsuk, melyek a legfontosabb tényezők. A tűzintenzitás vizsgálata biztosítja a kutatásnak azt az égésméleti hátterét, amelynek segítségével következtetéseket tudunk levonni a biomassa gyúlékonyságára és a tűzoltói taktikára. Végül elengedhetetlen az épített környezet tűzkockázatának is a vizsgálata, az emberi élet és az anyagi javak védelme érdekében.¹¹

Elemi tűzformák vizsgálata

A tűzterjedés dinamikus folyamat, amelynek térbeli megjelenítésekor lényeges az, hogy a tűz a terjedése során milyen alakot (elemi tűzformát) vesz fel.

A szabadterületi tüzek általánosságban a következő tűzformákat vehetik fel:¹²

- a) kör alak,
- b) félkör alak,
- c) egyszerű ellipszis,¹³
- d) ellipszis pár,¹⁴
- e) tojás forma,¹⁵
- f) legyező forma.¹⁶

A *kör alakú* tűzforma szabadterületi tüzek esetén meglehetősen ritka. Ehhez minden esetben homogén biomassa, szélcsend, illetve sík terep szükséges. Bármely előbbi

⁹ DEBRECENI 2019.

¹⁰ RESTÁS 2016; SEREG–KEREKES–ELEK 2019.

¹¹ VASS et al 2024.

¹² NAGY 2008.

¹³ VAN WAGNER 1969.

¹⁴ ANDERSON 1983.

¹⁵ PEET 1967.

¹⁶ BYRAM 1959.

feltétel egy időben nem teljesül, a tűz már más alakot fog felvenni. Ez a tűzforma könnyen számítható, tűzterjedés esetén a kör kerületének képletét kell figyelembe venni, a leégett területek számításakor pedig a kör területét.

$$K = 2r\pi \quad (1)$$

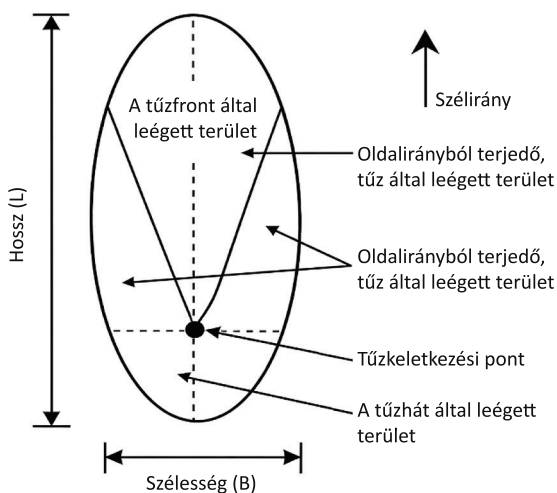
$$T = r^2\pi \quad (2)$$

A félkör alakú tűzforma szintén nagyon ritka. Ez a tűzforma a kör alakú tűzformán alapul, és kialakulásának feltételei is azonosak, azzal a különbséggel, hogy a tűz keletkezési helyén egy irányban nincs lehetőség tűzterjedésre. Ilyen lehet az, ha a tűz közvetlenül egy biomasszamentes terület mentén (például tűzpászta, földút) keletkezik. Ez a tűzforma is könnyen számítható, terjedés esetén a félkör kerületének képletét szükséges figyelembe venni, a leégett területek számításakor pedig a félkör területét.

$$K = r\pi + 2r \quad (3)$$

$$T = 0,5 r^2 \pi \quad (4)$$

Az ellipszis alakú tűzforma már eltér az előzőektől. Ebben az esetben jelentős befolyásoló tényező a szél iránya és sebessége, a domborzat, illetve a biomassza is. Elsősorban a szél adja a tűzforma „elnyújtott” alakját, ahogyan az 1. ábrán is látszik.



1. ábra: Ellipszis alakú tűzforma

Forrás: a szerzők szerkesztése VAN WAGNER 1969 alapján, Chat GPT 5.2 használatával

Az összes tűzforma közül ez a legelfogadottabb, hiszen a szélirányban a tűz gyorsabban terjed, így az ellipszis hosszabb tengelye a széliránnyal párhuzamos. A rövidebb tengely viszont merőleges a szélirányra, hiszen a tűz lassabban terjed széllel szemben.

vagy oldalszélben. Az ellipszis fókuszai a tűz keletkezési helye (tűzfészek) és az attól legmesszebbi elért pont. Ebben az esetben a tűz terjedési sebessége a széliránnyal megegyező irányban a leggyorsabb, illetve széllel szemben a leglassabb. A tűz alakja matematikailag könnyen leírható, jól mutatja azt, hogy változó környezeti feltételek esetén milyen a terjedő tűz alakja. Az ellipszis kerülete és területe a Ramanujan-féle megközelítés segítségével számolható, nem a legpontosabb eredményt adja, de megközelítő értékek megadására tökéletes.

$$K \approx \pi[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)}] \quad (5)$$

Egyszerűbb megközelítés (kevésbé pontos, de gyorsabb):

$$K \approx \pi \binom{3(a+b)}{2} - \binom{\sqrt{ab}}{2} \quad (6)$$

Az ellipszis területe pontosan kiszámítható a következő képlettel:

$$T = \pi \frac{L}{2} * \frac{W}{2} \quad (7)$$

ahol:

- L = a tűz hosszú tengelyének hossza (szélirányban) (nagy tengely),
- W = a tűz rövid tengelyének hossza (széllel szemben) (kis tengely).

Az *ellipszis párok* mint tűzforma logikusan az egyszerű ellipszisen alapul. Ezek a tüzek azonban két vagy több ellipszis alakú tűzfrontot jelölnek, amelyek közös tűzfészkekből vagy közel eső tűzfészkekből indulnak, de különböző irányokban, eltérő sebességgel terjednek. Az ellipszis párok nem feltétlenül szimmetrikusak, hiszen a terjedési sebesség és irány különböző környezeti paraméterektől (szél, terep, üzemanyag) is függ. Gyakori példa, hogy a szélirány hirtelen megváltozik, így a tűzfront kettéválhat, és két vagy több ellipszis alakú tűzfront keletkezik. Változó irányú szél esetén kezdetben egy ellipszis alakú tűzfront terjed, például észak felé, majd 2 óra elteltével a szél délkeleti irányba fordul, és ekkor a tűzfront kettéválk: az eredeti tűzfront terjed tovább északi irányba, de lassabban, míg egy új tűzfront kelet felé veszi az irányt már gyorsabban. Ennek eredményeként két ellipszis pár alakul ki, amelyek különböző irányokban és sebességekkel terjednek. Domborzat szempontjából a következőképpen néz ki: egy tűz a völgyben terjed, ahol a szél felfelé gyorsítja a tűzterjedést, míg a völgy oldalain már lassabban terjed a tűz. Ennek eredményeként a tűzfront ismét kettéválk, és két ellipszis alakú tűzfront keletkezik.

Számítása nem egyszerű, hiszen több tényező is befolyásolja, például hogy minden ellipszis párt függetlenül karakterizálhatunk, illetve, hogy a tűzfrontok „összeérése” esetén a tűz területe és kerülete újraszámításra szorul.

$$A = \Sigma(\pi \frac{L_i}{2} * \frac{W_i}{2}) \quad (8)$$

ahol:

- L1, L2: a hosszú tengelyek hossza (szélirányban),
- W1, W2: a rövid tengelyek hossza (széllel szemben).

Az ellipszis párok tehát a tűzterjedés komplex modelljei, amelyek változó környezeti feltételek mellett vagy több tűzfészek esetén alakulnak ki.

A *tojás alakú tűzforma* gyakori alak, amely nem szimmetrikus ellipszishez hasonlít, hanem inkább aszimmetrikus, egyoldalúan megnyúlt alakot ölt, akár egy tojás. Ez a forma általában akkor alakul ki, amikor a tűz terjedését egy irányban markáns tényezők (például erős szél, terep lejtése vagy egyoldalú üzemanyag-elterés) befolyásolják, de a terjedés nem egyenletes minden irányban. A tojás alakú tűzforma fontos a tűz terjedésének megértésében, mert segít előre jelezni, hogy a tűz melyik irányba terjed a leggyorsabban, és hol alakíthatja ki a legnagyobb veszélyt. A tűz egy irányba megnyúlt, a másik irányba viszont rövidebb és szélesebb, mint egy szabályos ellipszis. A hosszabbik vége általában a széliránnyal vagy a lejtő irányával megegyezik ott, ahol a tűz gyorsabban terjed. A rövidebb vége a széllal szemben vagy a lejtővel szemben található, ahol a tűz terjedése logikusan lassabb. Az alak nem szimmetrikus, hiszen a tűz terjedési sebessége és irányai nem egyenlők. A tojás forma kialakulását okozhatja viharos szél, a domborzat lejtése, a heterogén biomassa (sűrűsége, eltérő szárazsága) jelenléte, illetve egyéb természeti akadályok is (például folyók, utak, sziklaszirtek). A tojás alakú tűzforma nem feleltethető meg pontosan egy matematikai ellipszishöz, de megközelíthető aszimmetrikus ellipszis modell segítségével. A tűz kerülete nem számítható ki egy egyszerű képlettel, mert a tűzalak nem szabályos. Területe esetén a tűz hosszabbik tengelye (L) a széliránnyal vagy lejtővel megegyező, a rövidebb tengelye (W) viszont ezekre merőleges (mint a szimmetrikus ellipszis).

$$T = \pi \frac{L}{2} * \frac{W}{2} \quad (9)$$

A *legyező alakú tűzforma* akkor alakul ki, amikor a tűz egy tűzfészekből vagy egy keskeny tűzfrontvonalból indulva terjed több irányba, és a terjedési sebesség a szélirányban vagy a terepviszonyok miatt szélesebb tűzfrontot hoz létre, mint egy szabályos ellipszis vagy tojás alak. Ez a forma jellemzően szélirányváltozás vagy terepakadályok esetén jelenik meg. A legyező alakú tűzfront széles, nyitott szögben terjed, és gyakran rövid idő alatt nagy területen pusztít, ami komoly kihívást jelenthet a tűzoltók számára. A tűz egy tűzkeletkezési helyről indul, majd széles, legyező alakban terjed tovább. A tűzfront nem záródik be, hanem nyitott, széles ívet alkot, akár egy legyező. A terjedés nem egyenletes: a szélirányban vagy a lejtő mentén a tűz gyorsabban, míg más irányokban lassabban halad. A tűzfront széleinek hossza és sebessége eltérő, mivel a környezeti feltételek (szél, terep, üzemanyag) változóak. Kialakulásának oka lehet a váltakozó szélirány vagy hirtelen szélcsend, a domborzat, vagy ha több kisebb kiterjedésű tűz összeérve markáns tűzfrontot eredményez. Váltakozó szél esetén egy tűz például északi irányba indul, de a szél keletre fordul, és a tűz keleti irányba már gyorsabban terjed, míg nyugat felé lassabban. Ennek eredményeként a tűzfront legyező alakot vesz fel, és széles területet érint. Ha a tűz sík területet érint, ahol nincs komolyabb szélesebbesség, a tűz minden irányba egyenletesen terjed majd, és legyező alakú tűzfrontot hoz létre. A legyező formájú tűzfront nem feleltethető meg egyszerű geometriai alakzatoknak (például kör, ellipszis), mert a terjedés nem szimmetrikus. A tűz kerülete nem számítható egyszerű képlettel, mert a tűzfront nem szabályos.

A tűz megközelítő területét szektorterület-képlet alkalmazásával számíthatjuk ki (becsült összeg), ha feltételezzük, hogy a tűz egy szögben terjed.

$$A \approx \frac{\alpha}{360} \pi r^2 \quad (10)$$

ahol:

- α a legyező szöge (fokban),
- r a tűz átlagos terjedési távolsága a kiindulóponttól.

A legyező alakú tűz gyors terjedése miatt komoly kihívást jelent a tűzoltók számára.

Tűzterjedés sebességének vizsgálata

A felszíni tűzterjedés az erdőtüzek egyik alapvető folyamata, amely során a tűz a felszínen, az alsó biomassaszinten (például avar, fű, bokrok, lehullott ágak) terjed. Ez a terjedési forma különösen fontos az erdőtüzek kezdeti szakaszában, valamint a tűz terjedésének megértésében, hiszen a felszíni tűz gyorsan növelheti a leégett területet, de áttérhet a felső biomassaszintre is (koronatűz). A felszíni tűzterjedés sebessége és intenzitása számos tényezőtől függ, például a biomassza jellegétől, a környezeti feltételektől (szélsebesség, hőmérséklet, páratartalom), valamint a terepviszonyoktól (lejtő, akadályok) is.

A felszíni tűzterjedés modellezése kulcsfontosságú a tűzveszély értékelése, a tűzoltási stratégiák kidolgozása és a tűzviselkedés előrejelzése szempontjából. Ebben a kontextusban Richard C. Rothermel 1972-ben kidolgozott egyenlete – a Rothermel-egyenlet – forradalmasította a felszíni tűzterjedés kvantitatív leírását. Ez az egyenlet matematikailag leírja, hogyan függ a tűzterjedési sebesség a biomasszától, a környezeti feltételektől és a domborzattól:

$$v_t = I_r \zeta \frac{1 + \Phi_w + \Phi_s}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (11)$$

- V_t = tűzterjedés sebessége,
- I_r = reakcióintenzitás,
- ξ = reakcióintenzitás aránya (szélcsend idején),
- Φ_w = légmozgási tényező,
- Φ_s = domborzati tényező,
- P_b = biomassza egységnyi térfogata,
- ε = effektív biomassza felhevülési aránya,
- Q_{ig} = biomassza gyulladáspontra hevítéséhez szükséges energia.¹⁷

A Rothermel-egyenlet lényege, hogy ha a tűzterjedés egyik tényezője kisebb, de egy másik tényezője nagyobb, akkor is kaphatunk hasonló tűzterjedési értéket, ezért vizsgálatunkban nem egy meghatározott gyúlékony biomasszatípust veszünk alapul,

¹⁷ ROTHERMEL 1972.

hanem a tűz fizikai megjelenésének paramétereire fókuszálunk. Az egyenlet alapján tehát a tűzterjedést befolyásolja a reakcióintenzitás, a reakcióintenzitás azon aránya, amely a szomszédos biomassza-részecskéket meggyújtja, a szél iránya és sebessége, a domborzat, a biomassza egységnyi térfogata, az effektív biomassza felhevülési aránya, illetve a biomassza gyulladáspontja hevítéséhez szükséges energia.¹⁸

A Rothermel-egyenlet elsődrendű a tűzőkológia és a tűzvédelem területén, hiszen az egyenlet pontosan leírja a tűzterjedési sebességet a gyúlékony biomassza tulajdonságai (például méret, nedvesség, sűrűség), a környezeti paraméterek (például szélsébség, lejtő) és a tűz intenzitása alapján. Az egyenlet alapja a tűzterjedési szimulációs rendszereknek is. A Rothermel-egyenlet építőeleme ezenfelül olyan széles körben használt tűzterjedési modelleknek, mint a BehavePlus vagy a FARSITE, amelyek segítik a tűzviselkedés előrejelzését és a tűzoltási döntésekhez szükséges információk nyújtását.¹⁹ Az egyenlet segítségével tűzveszélytérképeket készítenek, amelyek segítik az erdőgazdálkodókat és tűzoltókat abban, hogy meghatározzák a legveszélyeztetettebb területeket és optimalizálják az erőforrások elosztását. Ezenkívül a Rothermel-egyenlet alapvető eszköz a tűzőkológiai kutatásokban és az oktatásban, hiszen segít megérteni, hogyan befolyásolják a különböző tényezők a tűzterjedést.

A tűzintenzitás számításának lehetőségei

Tűzintenzitás alatt a tűzfrontvonal 1 m hosszán, 1 s alatt felszabaduló hőenergia mennyiségét értjük. Ez az érték kW/m-ben határozható meg. Erdőtűzek intenzitásának elemzésekor a Byram-féle tűzintenzitást (*Byram fireline intensity*) vehetjük alapul. A Byram-féle tűzintenzitás számítása az erdőtüzek vizsgálatának egyik alapeleme, amely azt fejezi ki, hogy mennyi hőenergia szabadul fel a tűzfront 1 m hosszán, 1 s alatt. Az eredeti meghatározást Byram adta meg.²⁰ Fontos, hogy jelen esetben a tűzintenzitás nem a teljes tüzre vonatkozik, hanem kifejezetten a tűzfrontvonal menti égés erejét mutatja meg. Számításakor olyan lényeges adatokat kapunk, amelyek felhasználhatók a helyes tűzoltási taktika kiválasztásakor²¹ a tűz terjedésének előrejelzésekor, illetve az ökológiai hatások (például károsodott lombkorona) értékelésénél.²² A tűzfront intenzitásának számítására a következő képlet áll rendelkezésre:²³

$$I = H * w * R \quad (12)$$

- I = tűzintenzitás (kW/m) (helyenként FLI-nek jelölik),
- H = égéshő (kJ/kg),
- w = tűzfrontban elégett biomassza (kg/m²),
- R = tűzterjedés sebessége (m/s).

¹⁸ BODNÁR 2021.

¹⁹ NAGY 2008.

²⁰ BYRAM 1959.

²¹ TOMKA-PÁNTYA 2022; KANYÓ 2020.

²² NAGY 2013.

²³ BYRAM 1959.

A fentiek szorzata adja meg tehát, hogy 1 m tűzfront mennyi hőt bocsát ki 1 s alatt. Ez a módszer közvetlenül még nem veszi figyelembe a lánghosszt. A tűzfrontban elégett biomassza kapcsán a következőket érdemes megjegyezni. Byram képletében a „w” a tűzfrontnál ténylegesen elégő biomassza tömegét jelöli: $w [kg \cdot m^{-2}]$.

Ez nem a teljes rendelkezésre álló biomassza mennyisége, hanem annak csak az a része, amely elégett a lángzónában a tűzterjedés ideje alatt. Ennek kiszámítása külön is lehetséges a következők szerint:

$$w = W * \eta \quad (13)$$

- „W” az éghető anyag tűzterhelése ($kg \cdot m^2$),
- „ η ” az égés hatásfoka (0-1).

1. táblázat: A gyúlékony biomasszatípusok tűzterhelése

Gyúlékony biomassza típusa	(W) [$kg \cdot m^{-2}$]
Fű (száraz)	0,3–0,8
Avartakaró (lombos erdő)	0,8–1,5
Tűlevelű avar	1,5–3,0
Cserjés	2–6

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az égés hatásfoka függ a nedvességtartalomtól, a kiszáradási képességtől (1, 10 vagy 100 h-t követő kiszáradás), illetve az oxigénellátástól.

2. táblázat: Az égés hatásfoka egyes tüztípusoknál

Tüztípus	(η)
Gyors felszíni tűz	0,6–0,9
Nedves avar	0,3–0,5
Lassú, parázsló tűz	0,2–0,4

Forrás: a szerzők szerkesztése

Összességében tehát a tűzfrontvonal-intenzitás jelentősen függ a kialakult tűz típusától is, amit a 3. táblázat mutat be.

3. táblázat: Tűzfrontvonal-intenzitás egyes tüztípusok esetén

Tűz típusa	Tűzfrontvonal intenzitása (kW/m)
Alacsony intenzitású felszíni tűz	< 500
Közepes intenzitású felszíni tűz	500–2000
Nagy intenzitású felszíni tűz	2000–10 000
Lombkoronatűz	> 10 000

Forrás: a szerzők szerkesztése

A tűzintenzitás számításának másik lehetséges módja már a szabad területen kialakulni képes lánghosszt is figyelembe veszi (empirikus alapon). Számítási képlete a következő:

$$L = 0,0775 * I^{0,46} \quad (14)$$

- „L” a lánghossz,
- „I” a tűzintenzitás.

A képlet hatványfüggvényt tartalmaz, amelyben a 0,0775 érték egy illesztési konstans ($\alpha = e^{\log \alpha}$). Ez biztosítja, hogy az adott mértékegységek mellett a görbe átmenjen a mért adatok közepén. A 0,46 érték pedig az illesztett egyenes meredeksége, amely kifejezi, hogy a lánghossz nagyjából az intenzitás négyzetgyökénél kicsit gyengébben nő. Ez fizikailag azt jelenti, hogy a hő egy része radiációra, konvekcióra, illetve turbulens keveredésre megy el, és nem csupán „felfelé nyújtja” el a lángot. Az érték ezért nem 0,5 vagy 1, hanem 0,45–0,5 közé esik. A lánghossz a láng tengelye mentén mért hossza. A lánghossz mentő tűzvédelmi szempontból is mértékadó adat, hiszen meghatározható vele a helyes tűzoltási taktika. Ezt a 4. táblázat adatai mutatják meg.

4. táblázat: Helyes tűzoltási taktika az egyes lánghosszok esetén

Lánghossz (m)	Alkalmazható tűzoltástaktika
< 1,2	Kéziszerszámok segítségével
1,2–2,4	Hagyományos tűzoltás (gépjármű, szakfelszerelések)
2,4–3,5	Korlátozott beavatkozási képességek
> 3,5	Közvetlen oltás nem lehetséges (különleges gépjárművek, taktikai megoldások)

Forrás: a szerzők szerkesztése

Logikus tehát, hogy a tűzintenzitásból kiszámolható a láng becsült hossza. Példának okáért, ha:

$I = 2000 \text{ kW/m}$, akkor a fenti (14)-es képlet alkalmazásával meghatározható, hogy a láng hossza megközelítőleg 2,6 m, ami kihívást jelentő, ám még kezelhető felszíni tűznek felel meg.

$$L = 0.0775 * 2000^{0,46} = 2,6 \text{ m}$$

A tűzintenzitás tehát az erdőtűzek egyik legfontosabb tényezője, hiszen közvetlenül meghatározza a tűzfrontvonal mentén felszabaduló energia mennyiségét, ezzel meghatározva a tűzveszélyt is. A tűzintenzitás szoros kapcsolatban áll a lánghosszal, a hőterheléssel és azzal, hogy milyen beavatkozási, taktikai lehetőségek vannak egy adott vegetációtűznél. A tűzoltási taktikák megválasztása, az emberi élet és anyagi javak, valamint a védőzónák tervezése mind nagymértékben a tűzintenzitás becslésén alapul. Más szempontból a tűzintenzitás meghatározza a vegetáció vagy akár az épített környezet károsodásának mértékét. A következő fejezetben ezt vizsgáljuk meg részletesebben.

Az épületkár-potenciál számítása

Az épületkár-potenciál (*building loss potential*, BLP) egy kockázati mutató, amely azt fejezi ki, hogy egy adott erdőtűz – amely erdőhöz közeli lakott területek közelében terjed – mekkora valószínűséggel és milyen mértékben okozhat kárt az erdőszegély mentén található épületekben. Klasszikus értelemben nem fizikai képlet, mint a Byram-féle tűzintenzitás, hanem elsősorban integrált kockázati becslés, amely a tűz tulajdonságait és az épített környezet sérülékenységét kapcsolja össze. A BLP tehát megmutatja, hogy mekkora a valószínűsége annak, hogy az erdőszegély mentén található épületek a tűz által károsodnak vagy megsemmisülnek.

A BLP általában három fő komponens szorzataként vagy súlyozott összegként jelenik meg, úgymint tűzveszély, épületek kitettsége és épületek sérülékenysége. A *tűzveszély* mint kockázati komponens tartalmazza a tűzfrontvonal intenzitását,²⁴ az erdőterületen kialakulni képes láng hosszát, a tűz terjedési sebességét, illetve a tűz típusát (felszíni, korona). Az *épületek kitettsége* leírja, hogy hány épület érintett az erdőhöz közeli lakott területen (WUI), ezek milyen távolságra találhatók az éghető vegetációtól (erdőszegélytől), illetve, hogy milyen a lakott terület beépítettsége (például telepszerű, sűrű, ritka stb.). Az *épületek sérülékenysége* (WUI szempontból legfontosabb) komponens befolyásolja többek között a tető fajtája (nem mindegy, hogy fa, zsindely vagy cserép), a falburkolat, a nyílászárók és a karbantartás is.

A BLP a következőképpen számolható:

$$BLP = I * E * V \quad (15)$$

- „I” – tűzintenzitás (például Byram),
- „E” – épületsűrűség / kitettség,
- „V” – épületsérülékenységi index.

A legtöbb alkalmazásban ezek normalizált (0–1) vagy kategóriás értékek.

A Byram-féle tűzfrontvonal-intenzitás a BLP egyik legfontosabb változója, hiszen meghatározza a lánghosszt, a sugárzó hőterhelés mértékét, az égő zsarátnokok (röp-tűz) keletkezését. Ezek pedig közvetlen hatással vannak a tetők meggyulladására, a nyílászárók károsodására, illetve a homlokzatok gyulladására. Az erdőtűzek kapcsán a BLP-t használják:

- evakuálás meghatározására,
- WUI-területek azonosításában és tűzvédelmi tervezésben,
- biztosítási és kárbecslési modellekben,
- tűz megelőzési programok értékelésére.

A BLP tehát azt mutatja meg, hogy egy erdőtűz mekkora veszélyt jelent az épített környezetre. Számítása a tűzveszélyt (például Byram-féle tűzintenzitás), az épületek kitettségét és azok sérülékenységét egyesíti. Erdőtűzeknél különösen a WUI-területeken kulcsfontosságú ez a mutató. Tulajdonképpen nem egyetlen képlet, hanem

²⁴ BYRAM 1959.

egy döntéstámogató keretrendszer, amelynek nem a pontosság az elsődleges célja, hanem a kockázatok helyes felismerése. Tűzkockázatát természetesen befolyásolja az épület típusa,²⁵ a választott építőanyag²⁶ és a tűzvédelmi követelmények is.²⁷

Bár a kutatás ezen fejezetében elsősorban az épített környezet sebezhetőségére koncentráltunk, fontos még megemlíteni az erdőtűz káros ökológiai hatásait is. Ide tartozhatnak többek között az erdei talaj károsító hatásai,²⁸ a vízminőség romlása,²⁹ a káros vagy üvegházhatású gázok kibocsátása.³⁰

Következtetések

Az erdőtűzterjedés vizsgálatának eredményeként megállapítottuk, hogy a tűzterjedés alapját az elemi tűzformák adják, hiszen ezek határozzák meg a tűzterjedés fontos tényezőit. A tűzterjedés sebességének vizsgálata kulcsfontosságú a tűz időbeli lefolyásának és a veszélyeztetett területek előrejelzéséhez, mivel szorosan függ az éghető anyag tulajdonságaitól, az időjárástól és a domborzattól. A terjedési sebességgel szoros kapcsolatban áll a tűzfront mentén felszabaduló energia mennyiségét kifejező tűzintenzitás. A tűzintenzitás segítségével következtetni lehet a lánghosszra, a hőterhelésre és a közvetlen tűzoltási taktikai lehetőségekre is. Az erdőtűzek nemcsak a természetes környezetet érintik, hanem az épített környezetet is veszélyeztethetik. Ennek értékelésére szolgál az épületkár-potenciál számítása, amely a tűzveszélyt az épületek kitettségével és sérülékenységgel is összekapcsolja. Az erdőtűzterjedés komplex értelmezése így egyszerre támogatja a hatékony mentő tűzvédelmi döntéseket és a kockázatalapú tervezést is.

Felhasznált irodalom

- ANDERSON, Hal (1983): *Predicting Wind-Driven Wildland Fire Size and Shape*. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Online: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.69035>
- BODNÁR László (2021): *Az erdőtűzek oltásának hatékonyságát növelő módszerek kutatása és fejlesztése*. PhD-disszertáció. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem. Online: <https://doi.org/10.17625/NKE.2021.020>
- BYRAM, George (1959): *Combustion of Forest Fuels*. In DAVIS, Kenneth P. (szerk.): *Forest Fire: Control and Use*. New York: McGraw-Hill, 61–89. Online: www.frames.gov/documents/behavplus/publications/Byram_1959_CombustionOfForestFuels.pdf

²⁵ KOMLAI–RESTÁS–KEREKES 2021.

²⁶ CSORBA et al. 2025.

²⁷ KERÉKES–GYÖNGYÖSSY–ELEK 2017.

²⁸ HAJDU et al. 2024.

²⁹ LIPTAI–ENGLONER 2024.

³⁰ TEKNŐS–DEBRECENI 2022.

- CSORBA, Kristóf et al. (2025): Monitoring of Historical Structural Materials with Computed Tomography. *Structural Concrete*, 1–13. Online: <https://doi.org/10.1002/suco.202400149>
- DEBRECENI Péter (2019): Erdőtűz időjárési index használata az erdőtűz megelőzésben. In FACSKÓ Ferenc – KIRÁLY Gergely (szerk.): *VII. Kari Tudományos Konferencia a konferencia előadásainak és poszttereinek kivonatai*. Sopron: Soproni Egyetem Kiadó, 16.
- DEBRECENI Péter (2023): Kihívások és lehetőségek a hazai erdőtűz megelőzésben egy új európai megközelítés tükrében. *Védelem Tudomány*, 8(Ksz.), 119–127. Online: <https://ojs.mtak.hu/index.php/vedelemtudomany/article/view/13887/11323>
- HAJDU Flóra et al. (2024): Az erdőtűz talajra gyakorolt hatásainak vizsgálata számítógépes szimulációval I. Modellek vizsgálata. *Tűzvédelem*, 31(1), 5–8.
- KANYÓ Ferenc (2020): Középmagas társasházi tetőtűz tűzoltási taktikája. *Védelem Katasztrófavédelmi Szemle*, 27(4), 49–53. Online: www.vedelem.hu/letoltes/ujsag/v202008.pdf?5
- KEREKES Zsuzsa – GYÖNGYÖSSY Éva – ELEK Barbara (2017): Tűzoltó kábelek műanyag burkolatának új és hagyományos vizsgálati módszereinek összehasonlító elemzése. *Védelem Tudomány*, 2(3), 24–36. Online: <https://ojs.mtak.hu/index.php/vedelemtudomany/article/view/13129/10598>
- KOMLAI, Krisztina – RESTÁS, Ágoston – KEREKES, Zsuzsanna (2021): Fire Resistance Thermodynamic Test of Self-supporting Double Skin Metal Faced Sandwich Panels. In BODNÁR, László – Heizler, György (szerk.): *Proceedings of the Fire Engineering & Disaster Management Prerecorded International Scientific Conference*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 179–184. Online: <https://kvi.uni-nke.hu/document/kvi-uni-nke-hu/440-konferencia.pdf#page=181>
- LIPTAY Zoltán – ENGLONER Attila (2024): A klímaváltozás lehetséges hatásai a nagy folyóink vízminőségére: a vízminőségi modellezés peremfeltételeinek klímaparaméterezése. *Légkör*, 69(Ksz.), 30–36. Online: <https://doi.org/10.56474/legkor.2024.K.5>
- NAGY Dániel (2008): *Erdőtűzek megelőzési és oltástechnológiai lehetőségeinek vizsgálata*. PhD-disszertáció. Sopron: Nyugat-magyarországi Egyetem. Online: <http://doktori.uni-sopron.hu/id/eprint/30/1/disszertacio.pdf>
- NAGY Dániel (2013): *Erdőtűz megelőzési intézkedések erdővédelmi, tűzterjedési és ökonómiai paramétereinek kidolgozása*. Sopron: Nyugat-Magyarországi Egyetem.
- PEET, Geoffrey Brian (1967): The Shape of Mild Fires in Jarrah Forest. *Australian Forestry*, 31(2), 121–127. Online: <https://doi.org/10.1080/00049158.1967.10675433>
- RESTÁS, Ágoston (2016): The Examination of the Economical Effectiveness of Forest Fire Suppression by Using Theoretical Fire Spread Models. *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 15(1), 85–92. Online: <https://doi.org/10.32565/aarms.2016.1.8>
- RESTÁS Ágoston (2020): Az erdőtűzek intenzitásának változása a globális klímaváltozás hatására. In FÖLDI László – HEGEDŰS Hajnalka (szerk.): *Éghajlatváltozás okozta kihívások és lehetséges válaszok*. Budapest: Ludovika, 91–106. Online: https://doi.org/10.36250/00833_05

- ROTHERMEL, Richard (1972): *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Ogden: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Online: <https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/32533.pdf>
- SEREG Adrienn – KERÉKES Zsuzsanna – ELEK Barbara (2019): Az erdők környezeti vegetációjának hatása a tüzesetekre, a megelőzés egyes lehetőségei. *Védelem Tudomány*, 4(4), 74–90. Online: <https://ojs.mtak.hu/index.php/vedelemtudomany/article/view/13362/10788>
- TEKNŐS, László – DEBRECENI, Krisztina, A (2022): Disaster Management Aspects of Global Climate Change. In MOLNÁR, András – WENCZEL, Dóra (szerk.): *Third International Conference on Effective Response: Conference Proceedings*. Budapest: Magyar Vöröskereszt, 45–55.
- TEKNŐS László – KÓRÓDI Gyula (2016): A globális éghajlatváltozás biológiai kockázatainak elemzése, hatásainak vizsgálata a katasztrófavédelemre I. *Bolyai Szemle*, 1(1), 115–130. Online: www.uni-nke.hu/document/uni-nke-hu/bolyai-szemle-216-1.original.pdf
- TOMKA Péter – PÁNTYA Péter (2022): Elsődleges katasztrófavédelmi, tűzoltósági beavatkozások épített környezetben. *Polgári Védelmi Szemle*, 14(Ksz.), 143–152. Online: https://mpvsz.hu/pv_szemlek/pvszemle2022/index.html
- VAN WAGNER, C. E. (1969): A Simple Fire-Growth Model. *The Forestry Chronicle*, 45(2), 81–142. Online: <https://pubs.cif-ifc.org/doi/epdf/10.5558/tfc45103-2>
- VASS, GYULA et al. (2024): Results and Future of Disaster Management Research in the System of Law Enforcement Sciences. *Belügyi Szemle*, 72(5), 909–927. Online: <https://doi.org/10.38146/bsz-ajia.2024.v72.i5.pp909-927>
- XU, Qiang et al. (2018): Evaluate the Flammability of a Pu Foam with Double-Scale Analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133, 3329–3337. Online: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7494-2>