

Mesterséges intelligencia és térinformatika az erdőtüzek megelőzésében

Egy proaktív döntéstámogató modell

Artificial Intelligence and Geospatial Information in Forest Fire Prevention

A Proactive Decision Support Model

Kovács Ferenc t. alezredes
szerző

Csongrád-Csanád Vármegyei Katasztrófavédelmi Igazgatóság
Szegedi Katasztrófavédelmi Kirendeltség, tűzoltósági felügyelő
Email: Ferenc.Kovacs.Csongrad@katved.gov.hu

Absztrakt:

A cikk a hazai erdőtüz védelem stratégiai korszerűsítésének lehetőségeit vizsgálja, középpontba helyezve a reaktív kárfelszámolásról a proaktív kockázatmenedzsmentre történő paradigmaváltást. A cél egy olyan integrált védelmi rendszer bemutatása, amely a térinformatika (GIS) és a mesterséges intelligencia (AI) eszközeivel támogatja a döntéshozatalt, minimalizálva a beavatkozási időt és a környezeti károkat. A tanulmány első része a dinamikus kockázatbecslés módszertanát tárgyalja. A bemutatott GIS-alapú modell az „Overlay” (rávetítéses) technológia segítségével szintetizálja a statikus környezeti tényezőket (erdőállomány, domborzat) és a valós idejű meteorológiai változókat. A dolgozat különös figyelmet fordít a klímaváltozásnak leginkább kitett alföldi fenyvesekre és a városi-erdei érintkezési zónákra (WUI), ahol az emberi és természeti kockázatok halmozottan jelentkeznek. A preventív fejezet a biológiai és műszaki kockázatsökkentés új irányait elemzi. Részletesen bemutatásra kerül a „zöld tűzgáták” (Green Firebreaks) koncepciója, amely a gyúlékony fenyvesek lombos fajokkal történő sávok tagolásával gátolja a koronatüzek kialakulását és terjedését. A műszaki megoldások között a tanulmány kitér a modern monitoring rendszerekre, összehasonlítva a különböző optikai és infravörös elven működő detektálási technológiákat, amelyekkel a riasztási lánc drasztikusan lerövidíthető.

Kulcsszavak: erdőtüz védelem, dinamikus kockázatbecslés

Abstract:

The article examines strategic modernisation of domestic forest fire protection, focusing on shifting from reactive damage elimination to proactive risk management. The paper aims to present an integrated protection system that supports decision-making through geographic information systems (GIS) and artificial intelligence (AI), minimising intervention time and environmental damage. The first part of the study discusses dynamic risk assessment. The GIS-based model synthesises static environmental factors (forest stand, relief) and real-time meteorological variables using the “Overlay” technology. The paper pays special attention to the Great Plain pine forests and urban-forest interface zones (WUI), which are most exposed to climate change and where human and natural risks cumulatively increase. The prevention chapter analyses new directions in biological and technical risk reduction. The concept of “Green Firebreaks” is presented in detail, preventing the formation and spread of crown fires by dividing flammable pine forests into strips of deciduous trees. Among the technical solutions, the study covers modern monitoring systems and compares various optical and infrared detection technologies, thereby shortening the alarm chain.

Keywords: forest fire protection, dynamic risk assessment

1. BEVEZETÉS

A korszerű tűzvédelmi stratégia alapköve a paradigmaváltás a hagyományos, reaktív szemléletű kárfelszámolás felől a proaktív kockázatmenedzsment irányába. Ez a metodika nem más, mint a statikus környezeti tényezők (pl. erdőállomány típusa, domborzat, biomassza-terhelés) és a dinamikus változók (meteorológiai paraméterek, talajnedvesség) valós idejű szintézise, amely alapján meghatározható a beavatkozó állomány szükséges készütségi foka. A kockázatbecslés a modern döntéstámogató rendszerek alappillére, amely három fő dimenzióban növeli a védekezés hatékonyságát. A prediktív modellezés lehetővé teszi a „beavatkozás előtti” fázis optimalizálását. A veszélyeztetett szektorok előzetes azonosításával a hivatásos és az önkéntes állomány riasztási fokozata célzottan emelhető. Ez a „készenléti pozicionálás” drasztikusan csökkenti a felvonulási időt, ami a tűz korai fázisban történő megfojtásának feltétele. Erőforrás-allokáció és költséghatékonyság, azaz a kockázati térképezés lehetővé teszi az erőforrások (humán erő és technika) fókuszált diszlokációját. A preventív járőrszolgálatok útvonalának tervezése vagy a technikai monitoring rendszerek (AI-alapú kamerahálózatok, szenzorok) telepítése nem véletlenszerűen, hanem a kockázati súlypontok alapján történik, ami jelentős költségmegtakarítást és hatékonyságnövekedést eredményez. A kockázatelemzés kritikus eleme a vízutánpótlás tervezése. A modell segítségével kijelölhetők azok a vízhiányos, de magas kockázatú zónák (pl. Homokhátság), ahová indokolt a mobil víztározó kapacitások (pl. tartályok, medencék) előtelepítése (pre-positioning). Ez extrém tűzveszély esetén biztosítja a folyamatos oltóvíz-ellátást, ami a műveleti siker (a tűzfront megállítása) kritikus feltétele. Ezzel a logisztikai támogatás optimalizálása is megvalósítható.

2. VESZÉLYEZTETETT HELYEK AZONOSÍTÁSÁNAK MÓDSZERTANA

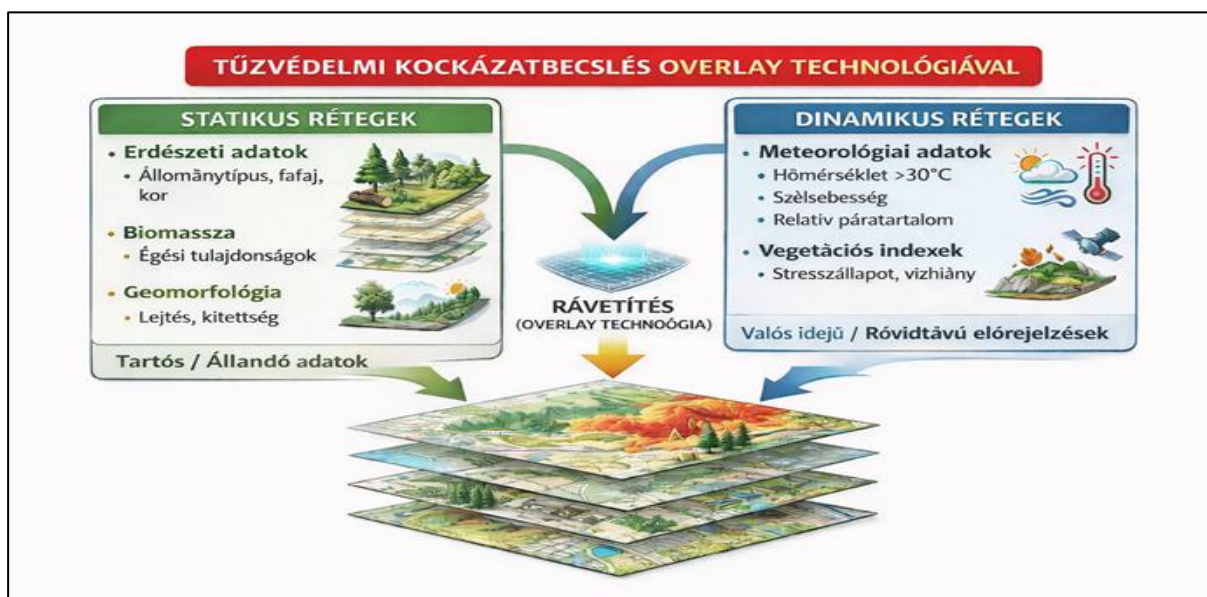
2.1 Az időjárási adatok integrálása a veszélyeztetett helyek azonosításába

A meteorológiai input paraméterek (hőmérséklet, szélvektorok, relatív páratartalom) térinformatikai feldolgozása és a területi adottságok szintézise alapján három, kritikus kockázati zónát definiálhatunk. Az alföldi fenyvesek és borókások (Kiskunság, Homokhátság) régiója mutatja a legmagasabb időjárási érzékenységet és a legrövidebb reakcióidőt. A laza szerkezetű homoktalajok rendkívül alacsony vízretenciós (vízmegetartó) képessége miatt a biomassza kiszáradása itt zajlik le a leggyorsabban. Már egy rövid, 3-4 napos hóhullám és a kritikus 30% alatti relatív páratartalom együttes jelenléte esetén ezek a területek (kiemelten a Bugac és a Kiskunság térsége) az ország leggyűlékonyabb "hotspotjaivá" válnak. A kockázatbecslés fókuszában itt a finom éghető anyagokban (tűlevél, száraz fű) fellépő, nagy terjedési sebességű felszíni tüzek korai detektálása áll. Középhegységi területeken a kockázati mátrix meghatározó eleme a szélviszonyok és a domborzat interakciója. A meteorológiai modellekből kinyert alapszélsőségek a mély völgyekben (csatornahatás) és a meredek lejtőkön (Mátra, Bükk, Bakony) lokálisan felerősödnek. A kockázatelemzésnek itt azonosítania kell azokat a kritikus topográfiai pontokat, ahol a kéményhatás érvényesül, azaz a domborzat "húzza" a tüzet felfelé. Műveleti szempontból ezek a legveszélyesebb zónák, mivel a beavatkozás lehetősége korlátozott, és a menekülési útvonalak hiánya közvetlen életveszélyt jelent az állományra. Városközeli erdők (Wildland-Urban Interface – WUI) kategóriában a meteorológiai kockázatokat súlyoznunk kell az antropogén (emberi) tényezőkkel. A szakirodalom ezt a területet Városi-Erdei Érintkezési Zónának (angol terminológiával: *Wildland-Urban Interface – WUI*) nevezi. [1] Ez az a speciális térszerkezetű határfelület, ahol az épített környezet (lakóházak, infrastruktúra) közvetlenül érintkezik vagy keveredik a gyűlékony vegetációval. A hazai viszonyok között (pl. a Budai-hegység agglomerációja, a Mecsek déli lejtői vagy a balatoni nyaralóövezetek) a WUI-zónák jelentik a legkomplexebb védelmi kihívást. A kockázatbecslés során itt két alaptípust kell megkülönböztetnünk. Érintkezési zóna (Interface WUI), ahol a zárt településszerkezet éles határvonallal találkozik az erdőtümbbel (pl. lakótelep az erdő szélén). Itt a tűz frontálisan támadja az épített környezetet.

Keveredési zóna (Intermix WUI), ahol az épületek szórványosan, a vegetáció közé ékelődve helyezkednek el (pl. hegyvidéki nyaralóövezetek, tanyavilág). Tűzvédelmi szempontból ez a kritikusabb típus, mivel a növényzet (biomassza) minden oldalról körülveszi a védendő objektumokat, és a menekülési útvonalak is a tűzön keresztül vezetnek. A kockázatbecslési algoritmusban a WUI területek kiemelt súlyozást kapnak, mivel magas a gyújtási valószínűség. A statisztikák szerint a tüzesetek 90%-a emberi tevékenységre (pl. grillezés, kerti hulladékégetés, dohányzás) vezethető vissza, ami itt koncentrálódik. Tűz esetén az erőforrásokat meg kell osztani a tűzoltás és a lakosság evakuálása/védelme között, ami taktikai hátrányt jelent. Ezért egy "átlagos" aszályos hétfvége a WUI-zónában – amennyiben az élénk turisztikai aktivitással párosul – exponenciálisan magasabb kockázati értéket generál, mint egy távolabbi, klimatikusan szárazabb, de embertől elzárt erdőtömb.

2.2 Térinformatikai elemzés

A veszélyeztetett zónák precíz identifikálása ma már elképzelhetetlen a többrétegű, térinformatikai alapú (GIS-based) kockázatelemzés nélkül. A Földrajzi Információs Rendszer (Geographic Information System) definíciója szerint egy olyan integrált hardver- és szoftver-keretrendszer, amely alkalmas a térbeli referenciával rendelkező adatok gyűjtésére, menedzselésére, manipulálására és komplex analízisére (Burrough, 1986). A statikus térképekkel ellentétben a GIS a geometriai objektumokhoz leíró adatbázist (attribútumtáblát) rendel, lehetővé téve a különböző adatrétegek közötti logikai műveletek elvégzését. [2] A tűzvédelmi kockázatbecslés során az ún. Overlay (Rávetítés) technológiát alkalmazzuk, amely három fő információs szint szintézisét jelenti. Statikus rétegek téradatbázis tartalmazza az erdészeti üzemtervi adatokat (állománytípus, fafaj, kor), a biomassza égési tulajdonságait, valamint a geomorfológiai viszonyokat (lejtés, kiettség), amelyek hosszú távon változatlanok. A dinamikus rétegek közé tartoznak a valós idejű, vagy rövid távú előrejelzésből származó meteorológiai inputok (hőmérsékleti anomáliák, relatív páratartalom, szélmezők), valamint a műholdas távérzékeléssel mért vegetációs indexek, amelyek a növényzet aktuális vízhiányát (stresszállapotát) mutatják. A fenti rétegek matematikai súlyozásával előálló végeredmény egy Dinamikus tűzkockázati térkép. Ez nem csupán egy vizualizáció, hanem egy döntéstámogató eszköz, amely cellaszintű pontossággal mutatja meg a tűzoltásvezetőnek a gyulladási valószínűséget és a várható tűzintenzitást, támogatva ezzel az erők előzetes diszlokációját.



1. ábra - A dinamikus erdőtüz-kockázatbecslés térinformatikai (GIS) rétegmodellje (készítette a szerző a Google Gemini segítségével)

A kockázatelemzési modell működési logikáját a mellékletben lévő 1. számú ábra szemlélteti, amely a GIS-alapú rávetítéses technológiát követi. A rendszer alapját (I. réteg) a statikus környezeti elemek képezik, beleértve az erdőállomány típusát és a kritikus infrastruktúrát (WUI zónák). Erre a fix alapra vetítjük rá a dinamikus változókat (II. réteg), ahol a valós idejű meteorológiai adatok mellett már megjelennek a származtatott mutatók, így a Pálfi-féle aszályindex (PAI) és az FWI rendszer értékei is. A rétegek matematikai súlyozásával és metszésével áll elő a döntéstámogatás eredője (III. réteg), egy olyan kockázati zónatérkép, amely nemcsak a veszély mértékét jelzi színkódokkal, hanem közvetlen utasítást ad az erőforrások allokációjára, vagyis arra, hogy hová kell előzetesen átcsoportosítani a tűzoltó egységeket és a technikai eszközöket.

2.3 Súlyozási szempontok a kockázatelemzésben

A veszélyeztetettség számszerűsítése során egy súlyozott döntési mátrixot alkalmazok. A kockázatbecslési modell megbízhatóságát alapvetően a bemeneti változókhoz rendelt súlyozási koefficiensek kalibrációjának pontossága determinálja. A módszertan kidolgozása során a nemzetközi szakirodalomban elfogadott protokollt követtem, amely – Chuvieco et al. (2010) ajánlása alapján – nemcsak a természeti adottságokat, hanem az antropogén eredetű gyújtóforrások (pl. közlekedési infrastruktúra közelsége) térbeli integrációját is alapkövetelményként kezeli. [3]

2.3.1 Vegetációs súlyozás: Az éghetőanyag-modellek osztályozása

A statikus kockázati tényezők hierarchiájában a vegetáció típusa és állapota képviseli a legnagyobb súlyt. A súlyozás bázisát itt a növényzet gyulladási hajlama és az égés során felszabaduló hőenergia intenzitása adja. A térinformatikai (GIS) adatbázisban az egyes erdőtürelésű állományokhoz a következő logikai súlyokat rendeltem (1-től 10-ig terjedő ordinális skálán). Túlevelű állományok (Súly: 9–10 / Extrém kockázat) Ez a kategória jelenti a legmagasabb kockázati faktort. Fizikai-kémiai magyarázata, hogy a fenyőfélék (erdeifenyő, feketefenyő) gyanta- és terpéntartalma rendkívül magas, ami égés közben „kémiai gyorsítóként” funkcionál, növelve a lánghosszt és a terjedési sebességet. További kockázatonövelő tényező az örökzöld lombosítványok vertikális folytonossága, amely hajlamosít a koronatűz kialakulására. Rothermel (1972) alapvető tűzterjedési modellje szerint ez a típus a legnehezebben kontrollálható, és itt a legmagasabb a röptűz kialakulásának valószínűsége is. [4] Cserjések és borókások (Súly: 7–8 / Magas kockázat) Kiemelt kockázatu kategória, különös tekintettel a hazai viszonyokra (pl. Kiskunság). A boróka magas illóolaj-tartalma miatt robbanásszerű égésre képes. Struktúráját tekintve a sűrű aljnövényzet és a cserjeszint vertikálisan növeli a tűz terjedési lehetőségét, ami biztosítja a folytonos éghető anyagot, amely a felszíni tüzet felvezeti a fák lombkoronaszintjébe, koronatűzet generálva. Lombos erdők (Súly: 3–5 / Mérsékelt kockázat) Közepes vagy alacsony kockázati besorolás. A keménylombos állományok (tölgyesek, bükkösök, cseresek) szövetei élő állapotban magasabb nedvességtartalmat tárolnak, így a gyulladáshoz szükséges aktiválási energia is magasabb. Fontos azonban megjegyezni a szezonálisitást, ugyanis vegetációs időszakban (nyáron) alacsony kockázattal számolhatunk a zöld lombosítványok nehezebb éghetősége miatt, azonban a nyugalmi időszakban (tavasszal/ősszel) a kockázat megnő, mivel a felhalmozódott száraz avar könnyen lángra kaphat, bár ez jellemzően csak felszíni tűzként jelentkezik.

2.3.2 Domborzati súlyozás

Bár a domborzat önmagában nem képez éghető anyagot, a kockázatbecslési modellben mint terjedési dinamikát módosító tényező jelenik meg. A GIS-alapú súlyozás során két kritikus alparamétert integrálunk. Az egyik a lejtőszög és tűzterjedés. A lejtő meredeksége és a tűzterjedés sebessége között nem lineáris, hanem exponenciális összefüggés áll fenn. A tűzfizikai modellek pl. McArthur-szabály alapján minden 10 fokos meredekség-növekedés megközelítőleg megduplázza a terjedési sebességet a lejtő irányába. [5] A meredek terepen a lángoszlop dőlésszöge közelebb kerül a felszínhez, így a sugárzó hő (radiáció) és a konvektív hőáramlás intenzívebben éri az előtte álló biomasszát. Ez a folyamat „előmelegíti” a növényzetet, drasztikusan csökkentve a gyulladáshoz szükséges időt. A referenciaérték a sík terep esetében 1,0.

Ehhez viszonyítva egy 20%-os vagy annál meredekebb hegyoldal – a kéményhatás kockázata miatt – kiemelt szorzót 1,5–2,0 kap a kockázati mátrixban. A kitettséget és a közvetlen napsugárzást vizsgálva a domborzat tájolása a biomassza nedvességtartalmát befolyásolja a napsugárzás mennyiségén keresztül. Déli és délnyugati kitettségű területek kapják a legmagasabb hőösszeget és a legalacsonyabb páratartalmat, így itt a vegetáció kiszáradása a leggyorsabb. Északi kitettség esetén az árnyékosabb, hűvösebb mikroklíma miatt a nedvességtartalom tartósabban megmarad, lassítva a gyulladási hajlamot.

2.3.3 Antropogén terhelés súlyozása

A hazai tűzstatisztikák alapján a vegetációtüzek több mint 99%-a emberi gondatlanságra vagy szándékosságra vezethető vissza. Ebből adódóan a tisztán fizikai-biológiai alapú térkép torzítana, ha nem integrálnánk a modellbe a humán aktivitás térbeli lenyomatát. Ezt a GIS rendszerben távolságalapú zónázással, ún. pufferzónák (buffers) kijelölésével kezeljük. [6] Lineáris infrastruktúra vonatkozásában az úthálózat és a vasútvonalak nem akadályként, hanem potenciális gyűjtőforrásvektorként szerepelnek. A modellben az utak tengelyétől számított 50–100 méteres sáv kapja a legmagasabb kockázati súlyt. Ebben a zónában koncentrálnak az eldobott cigarettacsikkékből, a gépjárművek műszaki hibáiból (katalizátor okozta tüzek) és az intenzív humán jelenlétből fakadó gyűjtások. A korábban már tárgyalt WUI zónák a legkritikusabb területi egységek, itt vannak azok az erdőrészek, amelyek közvetlenül érintkeznek lakott területtel. A térinformatikai elemzés során a településhatár 500 méteres sugarú pufferzónája „Extrém” kockázati besorolást kap. Itt a legmagasabb a gondatlan tűzhasználat (kerti hulladék égetése, grillezés, illegális hulladéklerakók gyulladása) valószínűsége, amely könnyen átterjedhet az erdőállományra.

3. KOCKÁZATKÖZMUNIKÁCIÓ RENDSZERE ÉS A TŰZVESZÉLY KIHIRDETÉSE

A kockázatbecslési folyamat operatív végterméke a lakosság és az erdőgazdálkodók felé kommunikált hatósági riasztás. Magyarországon ezt a funkciót egy jogilag szabályozott, preventív intézkedésrendszer, a tűzgyújtási tilalom (fokozott tűzveszély időszaka) valósítja meg. A védekezés jogszabályi hátterét elsődlegesen az erdőről, az erdő védelméről és az erdőgazdálkodásról szóló 2009. évi XXXVII. törvény (Evt.), valamint a végrehajtására kiadott miniszteri rendeletek biztosítják (2009. évi XXXVII. törvény az erdőről, az erdő védelméről és az erdőgazdálkodásról. [7] A fokozott tűzveszély időszakát az agrárminiszter rendeli el, jellemzően a Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal (NÉBIH) szakmai javaslatára, a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatósággal (BM OKF) történt előzetes egyeztetést követően. A területi hatályt tekintve a korlátozás elrendelhető országos jelleggel, vagy differenciáltan, vármegyei bontásban. A döntéshozatal bázisát a NÉBIH Erdészeti Igazgatósága által napi szinten futtatott FWI (Fire Weather Index) modell adja. Amennyiben a tűzveszélyességi index tartósan (több napon keresztül) eléri a „Magas” vagy „Nagyon Magas” kategóriát, az intézkedés automatikusan életbe lép (4/2008. (VIII. 1.) ÖM rendelet az erdők tűz elleni védelméről. [8.] A fokozott tűzveszély időszakában az 54/2015. (XII.15.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról alapján tilos tüzet gyújtani az erdőterületeken, valamint azok 200 méteres védőzónájában (külterületi ingatlanokon, szántókon), beleértve a kijelölt tűzrakó helyeket is. [9] Ez a 200 méteres pufferzóna kritikus jelentőségű, mivel a hazai vegetációtüzek domináns része agrárterületről terjed át az erdőállományra.

3.1 A lakossági tájékoztatás csatornái és hatékonysága

A riasztási rendszer hatékonyságát alapvetően determinálja az információ célba juttatásának sebessége. A jelenlegi hazai gyakorlatban a tájékoztatás két fő formában valósul meg. Passzív tájékoztatás formájában a NÉBIH és a Katasztrófavédelem hivatalos portáljain közzétett interaktív térképek. Ennek korlátja, hogy a lakosoknak aktívan keresnie kell az információt, automatikus értesítést nem kap. Aktív tájékoztatás formája többek között a közszolgálati médiumokban (TV, rádió) közzétett felhívások, valamint a VÉSZ applikáció, a BM OKF Veszélyhelyzeti Értesítési Szolgáltatása (VÉSZ) "push" üzenetet küld az okostelefon-felhasználóknak.

Ennek lefedettsége azonban korlátozott (csak az applikációt letöltők érik el). A technológiai fejlődés lehetővé tenné a cellalapú vagy helyalapú SMS-technológia integrálását az erdőtüzmegelőzésbe. Hasonlóan az árvízi riasztásokhoz, a rendszer automatikus figyelmeztetést küldhetne minden olyan mobilkészülékre, amely belép egy "Piros zónás" (kiemelt kockázatú) erdőterületre (pl. Bükk-fennsík). Az üzenet („*Fokozott tűzveszély! Tűzgyújtás tilos!*”) célzottan érne el a kockázati csoportot (turisták), növelve a prevenció hatásfokát.

3.2 Nemzetközi jó gyakorlatok komparatív elemzése

A hazai rendszer fejlesztése érdekében megvizsgáltam a tűzvédelemben élen járó államok kockázatkezelési modelljeit. Az Amerikai Egyesült Államokban a Nemzeti Meteorológiai Szolgálat (NWS) az ún. "Red Flag Warning" (Vörös Zászló Riasztás) rendszerét alkalmazza. Ez a modell a statikus (hetekig tartó) tilalommal szemben egy rövid távú (24–48 órás), de rendkívül súlyos figyelmeztetés. Pszichológiai hatása erősebb, mivel a lakosság ingerküszöbét a ritkább, de intenzívebb jelzések jobban elérik, elkerülve a „riasztási fásultságot”. (Továbbá a nemzeti parkokban a napi kockázati szintet vizualizáló *Smokey Bear* táblarendszert alkalmazzák. [10] Ausztráliában a "Total Fire Ban" napjain nemcsak a nyílt láng használata, hanem minden szikraképződéssel járó tevékenység (pl. hegesztés, sarokcsiszolás) tilos a szabadban. A jogszabálysértés szankcionálása elrettentő erejű (jelentős pénzbírság és szabadságvesztés), amelynek hazai adaptációja – az erdővédelmi bírság összegének emelésével – megfontolandó lehet. [11.] Franciaországban a dél-európai modell (pl. Provence-Alpes-Côte d’Azur régió) áll legközelebb a hazai viszonyokhoz. Itt a kockázati szinthez (Színkódok: Narancs/Piros/Fekete) igazítják az erdőlátogatási jogokat. A "Fekete" (Fekete zóna) fokozat esetén az erdőterületet fizikailag lezárják (sorompók, hatósági ellenőrzés), teljesen kiküszöbölve az emberi tényezőt. Itt meg kell jegyezni, hogy az Evt. 91. § (1) bekezdése Magyarországon is lehetőséget ad az erdőlátogatás korlátozására. Extrém aszályos időszakban (FWI > 50) ezen jogi eszköz alkalmazása indokolt lenne a kiemelt turisztikai célpontokon. [12]

3.3 A döntéstámogatás protokollja

A kockázatbecslési modellek (FWI, PAI, GIS) és a hatósági intézkedések közötti kapcsolatot egy szigorúan szabályozott intézkedési protokoll teremti meg. Ez biztosítja, hogy a szubjektív mérlegelés helyett objektív küszöbértékek vezéreljék a védekezést. Ez az integrált rendszer teszi lehetővé, hogy a védekezés proaktív válnon. A modell által előrejelzett „Piros” kód már 48 órával az esemény előtt elindítja a riasztási láncot, így mire a tűzveszély fizikailag realizálódik, a jogi korlátozások (tilalom) és a technikai erők már a megfelelő készültségi szinten állnak rendelkezésre. Ezzel a módszertannal a védekezés súlypontja a költséges és magas kockázatú kárfelszámolásról a megelőző logisztikai és jogi felkészülésre helyeződik át. A számított indexértékek és az azokhoz rendelt kötelező érvényű hatósági, illetve műveleti válaszlépések rendszerét a mellékletben lévő 1. számú táblázat szemlélteti.

Kockázati szint	FWI érték	Meteorológiai jellemzők	Hatósági intézkedés (Protokoll)	Műveleti készültség (Tűzoltóság)
I. ALACSONY (Zöld)	< 10	Hűvös, csapadékos idő, magas páratartalom.	Nincs korlátozás.	Normál ügyeleti rend.
II. MÉRSÉKELT (Sárga)	10 – 20	Átlagos nyári időjárás, helyi kiszáradás.	Figyelemfelhívás, tájékoztatás a NÉBIH honlapon.	Riasztási lapok előkészítése.

Kockázati szint	FWI érték	Meteorológiai jellemzők	Hatósági intézkedés (Protokoll)	Műveleti készültség (Tűzoltóság)
III. MAGAS (Narancs)	21 – 40	Tartós kánikula (>30°C), szél, alacsony pára.	Tűzgyújtási tilalom elrendelése (Vármegyei/Országos).	Fokozott készültség. Önkéntesek (ÖTE) készenléthe helyezése.
IV. EXTRÉM (Piros)	> 40	Aszály + Viharos szél + Kiszáradt biomasza.	Erdőlátogatási tilalom (Evt. 91.§) mérlegelése.	Erők átcsoportosítása, mobil víztározók telepítése, légi felderítés.

1. táblázat - Számított indexértékek és műveleti válaszleépések (készítette a szerző)

3.4 Megelőzés és kockázatsökkentés

A modern erdőtűz-védelem paradigmája szerint a kockázatsökkentés nem izolált technikai intézkedések ad hoc jellegű alkalmazása, hanem egy szigorú logikai láncolatra felfűzött, integrált védelmi rendszer. A hatékony prevenció stratégia célja a tűzesemények bekövetkezési valószínűségének minimalizálása, illetve a már kialakult tüzek terjedési dinamikájának lassítása. A kutatásom során a kockázatsökkentő tényezőket négy stratégiai beavatkozási területre, úgynevezett védelmi pillérre bontva rendszereztem:

Ökológiai reziliencia-növelés (Biológiai védelem): Az erdőállomány szerkezetének preventív átalakítása (pl. fafajcsere, elegyítés) a természetes ellenálló képesség fokozása érdekében.

Infrastrukturális védelem (Műszaki gátak): A tűz terjedését fizikailag akadályozó létesítmények (védősávok, tűzpázták) és a beavatkozást támogató műszaki hálózat (feltáró utak) kiépítése.

Biomassza-menedzsment (Tűzterhelés-szabályozás): A rendelkezésre álló éghető anyag mennyiségének és folytonosságának kontrollált csökkentése.

Monitoring és detektálás: A korai észlelés technológiai támogatása (szenzorhálózatok, távérzékelés) a reakcióidő minimalizálása céljából.

3.5 Biológiai kockázatsökkentés: Erdőszerkezet-átalakítás

A preventív védekezés leghatékonyabb, hosszú távú stratégiai eleme a biológiai alapú kockázatsökkentés. Ahogy a térinformatikai (GIS) elemzést tárgyaló fejezetben igazoltuk, hazai viszonylatban a homogén fenyvesek jelentik a kritikus veszélyforrást. A beavatkozás célja ezen állományok esetében a rezisztencia (ellenálló képesség) növelése. A gyakorlatban ez a lombosítás és elegyítés erdőművelési módszerével valósítható meg, melynek során az egynemű fenyves tömböket sávos vagy mozaikos elrendezésben telepített lombos fajokkal (pl. tölgy, cser, akác) tagoljuk. A beavatkozás azon az ökológiai tényen alapul, hogy a lombos fák leveleinek nedvességtartalma (Leaf Moisture Content) a kritikus nyári időszakban is szignifikánsan magasabb, továbbá zárt koronájuk árnyékoló hatása révén a talajszint mikroklímáját nedvesebben tartják, gátolva az avar kiszáradását. A kialakított védősávok a szakirodalomban „zöld tűzgátként” (Green Firebreaks) ismertek: ezek a zónák megszakítják az éghető biomassza horizontális folytonosságát, megtörik a tűzfront lendületét, és drasztikusan csökkentik a kontrollálhatatlan koronatűz kialakulásának kockázatát. [13] A tűlevelű és a lombos állományok közötti tűzvédelmi különbség három alapvető fizikai-kémiai tényezőre vezethető vissza. A tűlevelűek (különösen a hazai Pinus fajok: erdeifenyő, feketefenyő) szövetei evolúciós okokból, magas koncentrációban tartalmaznak gyantaszármazékokat és illékony szerves vegyületeket (terpéneket). Ezek az anyagok a tűz közeledtével, a sugárzó hő hatására már alacsony hőmérsékleten (100–200°C) gázosodnak, és az oxigénnel keveredve robbanásszerű, exoterm (hőtermelő) égést produkálnak.

Ezzel szemben a lombos fafajok (tölgyek, juharok) szövetei minimális illóolajat tartalmaznak. Égési mechanizmusuk endoterm (hőelvonó) jelleggel indul, mivel a lángra kapáshoz szükséges aktiválási energiát a növényi nedvesség elpárologtatása emészt fel, lassítva ezzel a pirolízis folyamatát. [14.] Második tényező tűzvédelmi szempontból a növényi víztartalom, amely egyben a legkritikusabb változó. Aszályos periódusban a fenyőfélék tűleveleinek nedvességtartalma drasztikusan lecsökken, miközben az elhalt, gyantás tűlevelek évekig az ágrendszeren maradhatnak. Ezzel szemben a vegetációs időszakban a lombos fák leveleinek víztartalma szignifikánsan magasabb. A „zöld tűzgát” hatásmechanizmusa a víz fizikai tulajdonságain alapul: egy élő tölgyfalevél elpárologtatása (a fázisátalakulás hőigénye miatt) jelentős energiát von el a tűztől, csökkentve a lánghosszt és az intenzitást (kW/m). A harmadik tényező az avarstruktúra. A felszíni tüzek terjedési sebességét a talajszinten felhalmozódott holt biomassza szerkezete determinálja. A fenyőávar esetében elmondható, hogy a magas lignintartalom és a savas kémhatás miatt lassan bomlik. A tűlevelek alakjukból adódóan laza, magas levegőtartalmú (aerált) réteget képeznek, amelyben az oxigénellátottság kiváló, így a tűz gyorsan terjed. Ezzel szemben a lombos avarban a széles levelek a talajra hullva rétegesen összetapadnak, tömörödnek (kompaktálódnak). A nedvesebb mikroklíma és az intenzív talajélet miatt gyorsan humuszosodnak, így a felszíni tűzterhelés itt nagyságrendekkel alacsonyabb, a tűz terjedése pedig a levegőhiány miatt gátolt. A „Zöld Tűzgátak” (Green Firebreaks) hatásmechanizmusa a védekezés-taktika alaptézise, hogy amennyiben a beavatkozó állomány koronatűzzel szembesül, az elsődleges cél a láng „földre kényszerítése”, mivel a 20–30 méter magas lángoszlopokkal szemben a közvetlen oltás lehetetlen. Amikor a fenyvesben tomboló koronatűz eléri a stratégiaileg elhelyezett lombos sávot (zöld tűzgátat), a tűz viselkedése drasztikusan megváltozik. [15] A folyamat fizikája, hogy a lombos fák koronája a magasabb nedvességtartalom miatt nem gyullad meg azonnal a sugárzó hőtől. Ezzel párhuzamosan a tűz „üzemanyaga” (a gyúlékony, gyantás tűlevél) hirtelen elfogy. Ennek következtében a tűz elveszíti termikus energiáját, intenzitása csökken, és a koronaszintről leereszkedik a talajszintre. Ez a momentum teremti meg a taktikai lehetőséget a beavatkozásra: a talajszinten mozgó tűz ellen a tűzoltó egységek már képesek sikeres földi támadást indítani. A lombos állományok passzív védelmi funkciója nyáron is érvényesül. A sűrű, zárt lombkorona árnyékoló hatása miatt a tölgyesekben a talajszint hőmérséklete mérések szerint 5–8 °C-kal alacsonyabb, míg a relatív páratartalom 10–20%-kal magasabb lehet, mint egy ritkás szerkezetű fenyvesben. [16] Ez a nedvesebb mikroklíma önmagában is gátolja a tűz terjedési sebességét. Hazai vonatkozásban meg kell állapítani, hogy a klímaváltozás kényszerítő hatása ellenére a teljes fafajcsere gazdasági okokból nem realitás, ezért a hangsúlyt a stratégiai fragmentációra kell helyezni. Sávos telepítésnél a nagy kiterjedésű, összefüggő fenyves tömböket (pl. Kiskunság) 20–50 méter széles lombos sávokkal szükséges tagolni ("feldarabolni"), amelyek fizikai tűzgátként funkcionálnak. Mozaikos elegyítést alkalmazva a fenyők közé szórványosan vagy csoportosan ültetett lombos fák csökkentik az éghető biomassza horizontális és vertikális folytonosságát. Összegezve, a lombosítás a passzív tűzvédelem leghatékonyabb ökológiai eszköze, amely a tűzterjedés fizikai gátlása mellett a biodiverzitás növelésével az erdő általános rezilienciáját (ellenálló képességét) is javítja.

3.6 Erdőszegélyek, azaz „Árnyékolt Tűzpászták” kialakítása

Az erdőszegélyek szerepe kettős: egyrészt fizikai akadályt képeznek, másrészt aktívan módosítják a mikroklímát (szélsebesség, páratartalom). A nemzetközi szakirodalom ezt a zónát „Fuel Management Zone” (éghetőanyag-kezelési zóna) vagy „Shaded Fuelbreak” (árnyékolt tűzpásztá) néven definiálja. [17] A leghatékonyabb védelmet a lépcsőzetes állományszerkezet biztosítja. A külföldi (főként amerikai és mediterrán) modellek alapján az uralkodó szélirány felől a következő profil kialakítása javasolt: Külső zónában az erdő és a mezőgazdasági terület találkozásánál egy rendszeresen kaszált, alacsony fűsávnak kell elhelyezkednie, amely megakadályozza a tarlótüzek áttérjedését. Cserjeszinten sűrű, de alacsony növésű, nehezen égő cserjék (pl. kökény, galagonya, bodza) sávja. Funkciója a szikraszúrás: a szél által szállított izzó parazsat (röptűz) ez a levéltömeg fizikailag megfogja és kioltja, mielőtt az elérné a belső állományt. Lombos fafajok sávjában magas, sűrű koronájú fák (juhar, hárs, tölgy) telepítése javasolt.

Árnyékolásukkal nedvesen tartják az aljnövényzetet, koronájukkal pedig megtörik a szelet, felfelé kényszerítve a légáramlatot, ami csökkenti a tűz terjedési sebességét. [18] A helyesen kialakított erdőszegély nemcsak passzív fal, hanem aktív áramlámódosító tényező. Mérések igazolják, hogy a sűrű szegélyállományok a nyílt terepen fújó szél sebességét a lombkorona alatt akár 50–70%-kal is csökkenthetik. Mivel a tűz terjedési sebessége a szélesebb négyzetével arányos, ez a beavatkozás drasztikus kockázatcsökkentést eredményez. A lombos fák levelei széles felületükkel „szűrőként” fogják fel a repülő szikrákat, amelyek a magas víztartalmú felületen – gyűjtőhatás nélkül – elhamvadnak.

3.7 Műszaki kockázatcsökkentés: Védősávok, tűzpászták

A biológiai védekezés mellett a prevenció műszaki gerincét a tűzpászták hálózata alkotja. Definíció szerint ezek olyan mesterségesen kialakított lineáris létesítmények, amelyek elsődleges funkciója az éghetőanyag-folytonosság fizikai megszakítása. A gyakorlatban két alapvető típust különböztetünk meg:

Az első típus **az ásványi talajig tisztított tűzpásztá**, mely a hazai erdőgazdálkodásban legelterjedtebb, klasszikus védelmi elem. Kialakítása során a mechanikai talajmegmunkálással (erőgépre szerelt tárcsa vagy eke segítségével) a vegetációt teljes mértékben kiforgatják, feltárva az éghetetlen, tiszta ásványi talajfelszínt. A sáv szélességét a nemzetközi sztenderdek alapján úgy kell meghatározni, hogy az meghaladja a vegetációtípusra jellemző várható lánghosszt. Operatív és logisztikai szempontból a minimum 3–6 méteres szélesség az irányadó, amely nemcsak a tűzterjedést gátolja, hanem biztosítja a gépjárműfecskendők biztonságos felvonulását és manőverezését is. Alkalmazása elsősorban erdőtagok határvonalán, vasúti pályatestek mentén, valamint a nagy kiterjedésű, homogén fenyves tömbök feldarabolására indokolt.

A másik típus a kezelt biztonsági zóna a klasszikus tűzpasztánál szélesebb (20–50 méteres), **pufferzónaként funkcionáló sáv**. Ebben a zónában nem történik teljes talajbolygatás. A cél a biomassza mennyiségének drasztikus csökkentése rendszeres gyéritéssel. Kulcsfontosságú az alsó ágrendszer 2–3 méter magasságig történő felnyesése. Ezzel a beavatkozással megszüntetjük az ún. „tűzlétrát”, megakadályozva, hogy a felszíni tűz felkússzon a lombkoronaszintbe. Funkciója a tűz intenzitásának és hő kibocsátásának mérséklése. A csökkentett intenzitású tüzet a zóna belső oldalán húzódó ásványi sávnál a beavatkozó egységek már biztonsággal lokalizálni tudják. [19] A hazai statisztikák elemzése rámutat, hogy a mesterséges közlekedési folyosók (vasút, közút) kiemelt gyűjtőforrás-vektorként funkcionálnak. A védekezés alapja ezen területeken a jogszabályi kötelezettségen alapuló sávos karbantartás. A vasúti pályatestek környezete extrém kockázati zónának minősül a fékezéskor keletkező szikra, valamint a felsővezeték-hibák miatt. A pályauzemeltető kötelessége a zúzottkő ágyazattól számított védőtávolságon belül a teljes gyommentesítés fenntartása. Vegyszeres (herbicides) kezelés vagy mechanikai talajmarás elmaradása esetén a száraz aljnövényzet könnyen vezeti a tüzet a töltésrézsűről a szomszédos erdőállományba. A közutak mentén a védősáv funkcióját az útpadka és az árokpart látja el. Az eldobott cigarettacsikkok okozta tüzek megelőzésében a „tiszta padka” a leghatékonyabb passzív védvonal. A védősávok taktikai és műveleti jelentősége kettős, és túlmutat a passzív gát funkció: logisztikai és felvonulási útvonal, ugyanis a zárt erdőállomány belseje a sűrű aljnövényzet és a domborzati viszonyok miatt gyakran járhatatlan a nehéz kategóriás terepjáró gépjárműfecskendők számára. A tűzpászták biztosítják azt a szilárd alapú nyomvonalat, amelyen keresztül a gépjárművek megközelíthetik a tüzet, biztosítva a folyamatos oltóanyag-utánpótlást. A beavatkozás biztonságát is növeli, ugyanis az időjárási körülmények hirtelen megváltozása esetén (pl. szélfordulás) a személyi állomány ezen a vegetációmentes sávon tud biztonságosan és gyorsan visszavonulni a gyülekezési pontra. [20]

3.8 Az erdő „tüzelőanyagának” csökkentése

A tűz viselkedését meghatározó tényezők közül az időjárás és a domborzat adottság, emberi beavatkozással nem módosítható. A prevenció egyetlen operatív beavatkozási pontja ezért a harmadik tényező: a rendelkezésre álló éghető anyag mennyiségének és szerkezetének szabályozása. A fakitermelések után visszamaradó gallyzat kiszáradva extrém tűzveszélyt jelent. A modern erdőművelési gyakorlatban a helyszíni aprítás (mulcsozás) az elsődleges eljárás. A zúzott faanyagot a talajba dolgozzák, ami megváltoztatja az anyag szerkezetét: a laza, levegős gallyhalmok helyett (amelyek gyorsan égnek) egy tömör réteg keletkezik. Mivel a mulcs még évekig gyúlékony maradhat, innovatív kísérleti eljárás a bomlási folyamat mesterséges felpörgetése. Ennek során nitrogéntartalmú oldatokat (pl. karbamid) vagy specifikus, korhasztó gombatörzseket (pl. *Phlebiopsis gigantea*) juttatnak a zúzalékra. Ez a kezelés a veszélyes faforgácsot rövid idő alatt veszélytelen, nedvességmegtartó humusszá alakítja. [21] Ahol a gépi zúzás a domborzat (pl. meredek hegyoldalak) vagy a természetvédelmi korlátozások miatt nem kivitelezhető, ott alkalmazható az irányított legeltetés. Kérődző állatok (főleg kecskék és juhok) célzott, rotációs ráengedése a veszélyeztetett védősávokra. A kecskék táplálkozás-talajbiológiai sajátossága, hogy szelektíven fogyasztják a fás szárú cserjéket és a szúrós bozótot, amelyet a gépi zúzás nehezen ér el. Mivel két lábra ágaskodva akár 1,5–2 méter magasságig is legelnek, megszüntetik a növényzet vertikális folytonosságát. Járulékos haszon a fosszilisanyag-kibocsátásmentes üzemeltetés, valamint az avar paták általi talajba dolgozása. [22] A nyésés és ágletisztítás nem a talajon lévő biomassza mennyiségét csökkenti, hanem annak függőleges eloszlását módosítja. A fenyők alsó, elszáradt ágai elősegítik a tűz terjedését lombkoronába. Az alsó ágrendszer 2–3 méter magasságig történő szisztematikus felnyesése fizikailag megszünteti az összeköttetést a talajszint és a koronaszint között. Ez a technika a pusztító koronátüzek megelőzésének legköltséghatékonyabb módja. Meg kell még említeni a kémiai vegetációkezelést, mely bár az erdőállomány belsejében általában tilos, a lineáris infrastruktúrák (vasúti töltések, távvezeték-nyiladékok) védelmében elengedhetetlen a vegyszeres gyomirtás. Célja a növényzet teljes és tartós eliminálása az ásványi talajszintig. A kezelés kritikus pontja az időzítés. A vegyszerezés után az elszáradt, lábbon álló növényzet átmenetileg gyúlékonyabb, mint az élő biomassza, ezért a kezelést kora tavasszal kell elvégezni, hogy a tűzveszélyes nyári időszakra a növényi maradványok már lebomoljanak. Magyarország vonatkozásában specifikum, amelyben a szociálpolitika és a tűzvédelem érdekei találkoznak a „szociális tűzifa” program. A lakossági rőzsegyűjtés (3–5 cm átmérő alatti ágfa) engedélyezése révén a lakosság effektív munkaerőként távolítja el a potenciális gyűjtőanyagot. Ez egy klasszikus „win-win” szituáció: az erdészet számára költségmentes a terület-tisztítás, miközben csökken a lakott területek tűzveszélyeztetettsége.

3.9 Figyelőrendszerek és korai detektálás – a technológiai monitoring

A tűzoltás-taktika alapvető tétele az időtényező. A tűz viselkedésére jellemző, hogy a kezdeti lineáris terjedési szakasz után – a környezeti feltételek függvényében – exponenciális gyorsulási fázisba lép. A monitoring rendszerek elsődleges célja a detektálási idő minimalizálása, azaz a füstoszlop fizikai megjelenése és a riasztás generálása közötti intervallum radikális lerövidítése. A modern, humán munkaerőt kiváltó észlelési architektúra három technológiai pilléren nyugszik:

1. Optikai spektrumú (RGB) elemzés: a rendszer gerincét a magaslati pontokra telepített, nagy felbontású, 360 fokban pásztázó kamerák alkotják. A háttérsoftver valós idejű képfeldolgozást végez. Az algoritmus nem a lángot (amely nappal nagy távolságból láthatatlan), hanem a füstoszlop vizuális mintázatát keresi. A füst sajátos gomolygását, textúráját és szürkeárnyalatait (kontraszt) azonosítja a statikus háttérhez (kék ég, zöld vegetáció) viszonyítva. [23]

2. Infravörös detektálás: a hőkibocsátás mérésén alapuló technológia. Előnye, hogy éjszakai látási képességet biztosít, és képes detektálni a sűrű lombkorona alatt rejtőzködő tüzet is, amennyiben a felszálló hőáramlat megjelenik a koronaszint felett.

3. **Térinformatikai háromszögelés:** a rendszer a hálózati működésben válik teljessé. Amennyiben egy füstjelet két, egymástól távol eső torony szenzora is azonosít, a központi GIS-rendszer a látószögek metszéspontjából méterre pontosan meghatározza a tűz koordinátáit. [24] A globális piacon jelenleg négy domináns rendszer határozza meg a szabványokat, melyek eltérő földrajzi és domborzati viszonyokra optimalizáltak:

1. **IQ FireWatch** (Németország): A Német Űrkutatási Központ (DLR) spin-off fejlesztése, amely eredetileg űrszondák szenzortechnológiáján alapul. [25] Egyetlen, nagy érzékenységgű multispektrális szenzort alkalmaz. Hatékonyságát jelzi, hogy képes akár 15–20 km távolságból detektálni egy 10x10 méteres füstfelhőt. Jelenleg ez a síkvidéki fenyvesek (pl. Brandenburg tartomány) védelmének szabványa. Hazai viszonylatban a Kiskunság és az Alföld védelmére ez a legalkalmasabb technológia (Korai erdőtüzek észlelése – iq.firewatch.com ; 2026.).

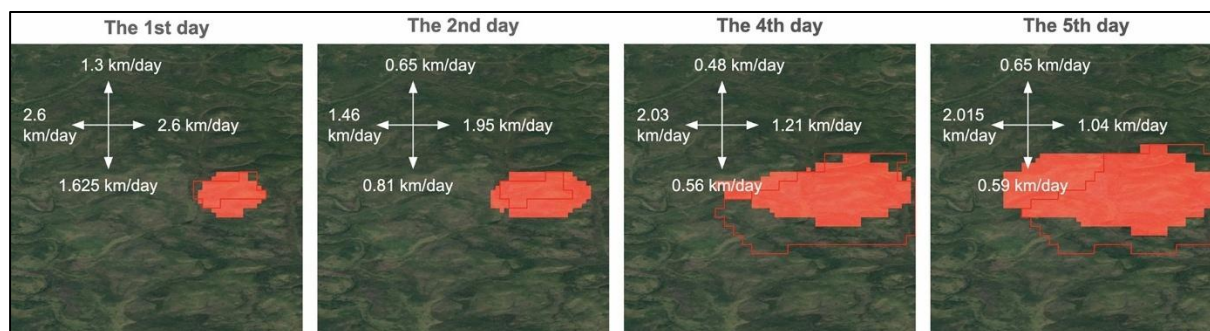
2. **ADELIE** (Franciaország): A Paratronic cég fejlesztése, kifejezetten a komplex, tagolt domborzatra (hegyvidék). A rendszer kombinálja a vizuális adatokat a meteorológiai állomások méréseivel. Kulcseleme a gépi tanulás, ahol a kezelő betaníthatja a szoftvert az állandó, „fals” hőforrások (pl. ipari kémények, kőbányák pora) figyelmen kívül hagyására, minimalizálva a téves riasztásokat. [26]

3. **ForestWatch** (Dél-Afrika): Az Envirovision rendszere, amely a füst dinamikus viselkedésére fókuszál. [27] Olyan mozgásanalízist alkalmaz, amely képes megkülönböztetni a füst „gomolygását” a szél által felkavart porfelhőktől, így sivatagos vagy száraz területeken is megbízható (Forestwatch – Protecting property, defending people, preserving resources; evolutions.biz; 2026.).

4. **Insight Robotics** (Hong Kong / Globális): A legmodernebb hibrid megoldás, amely kifejezetten a WUI zónák (városkörnyéki erdők) védelmére fókuszál. Fix telepítésű hőkamerás robotok és drónok integrációja, amely 5 km-es távolságból 5 méteres pontosságú lokalizációt tesz lehetővé. [28]

Magyarországon kísérleti jelleggel már üzemelnek hasonló rendszerek, például a Bács-Kiskun vármegyei fenyvesekben (KEFAG Zrt. területe). A hazai erdőtüzvédelem jövőbeli fejlesztési iránya a szigetzerű megoldások helyett egy integrált országos monitoring hálózat létrehozása. Ennek keretében a meglévő meteorológiai hálózat és a térfigyelő kamerarendszerek adatait egy központi, mesterséges intelligenciával (AI) támogatott GIS felületen kellene egyesíteni, amely valós idejű döntéstámogatást nyújtana a katasztrófavédelem számára. A vizuális (kameraalapú) megfigyelés korlátait – különösen a tagolt domborzatú, „vakfoltokkal” teli területeken – a legújabb fejlesztési irány, a vezeték nélküli szenzorhálózatok (Wireless Sensor Networks – WSN) hivatottak kompenzálni. Ez a technológia az erdőállomány mélyére, a fák törzsére telepített autonóm, kisméretű mérőegységek (csomópontok) hálózatából áll, amelyek valós időben monitorozzák a mikroklíma paramétereit (hőmérséklet, relatív páratartalom, CO₂-koncentráció). A rendszer nem csupán a statikus értékeket figyeli, hanem a változás dinamikáját (gradiensét). A riasztási algoritmus a hirtelen hőmérsékleti ugrásra (Heat Spike) van kalibrálva: amennyiben a szenzor extrém rövid idő alatt drasztikus emelkedést regisztrál (pl. percek alatt 30°C-ról 60°C-ra), az a tűz fizikai közelségét jelzi. Ez a megoldás ott is képes jelezni a tüzet (pl. mély völgyek, sűrű aljnövényzet), ahol a füstoszlopot a domborzat vagy a lombzat még takarja a távoli kamerák előtt. A modern tűzoltásvezetés paradigmája a reaktív (eseménykövető) magatartásról a proaktív (előrejelző) stratégiára vált. A megfigyelés önmagában nem elegendő; a hatékony beavatkozáshoz szükséges a tűz alakulásának jövőbeni ismerete. Ezt a célt szolgálják a mesterséges intelligenciával (AI) támogatott terjedési szimulációk. A parancsnoki döntéstámogató szoftverek (pl. a nemzetközileg alkalmazott FARSITE vagy Prometheus modellek) komplex bemeneti adatokkal dolgoznak. Dinamikus adatok között a kamerák és szenzorok által mért valós idejű tűzpozíció és széladatok, míg statikus adatokban a domborzatmodell és az éghetőanyag-térkép jelenik meg.

A szimuláció eredménye egy dinamikus térkép, amely időszagos bontásban ábrázolja a tűz várható mozgását (2. sz. ábra). Ez az információ a kárhelyparancsnok számára létfontosságú a kritikus döntések meghozatalához, így többek között mely településrészeket és mikor kell evakuálni, illetve hová kell átcsoportosítani a vízszállítókat és a műszaki egységeket, hogy a tűz útját egy stratégiai védvonalon (pl. egy úton vagy nyiladékon) még az érkezése előtt elvágják. [29]



2. ábra: Tűzterjedési szimuláció (MA-Net modell) (Forrás: ld. [32])

3. KÖVETKEZTETÉS

A cikkben bemutattam az integrált védelmi rendszert, amely a térinformatika (GIS) és a mesterséges intelligencia (AI) eszközeivel támogatja a döntéshozatalt, minimalizálva a beavatkozási időt és a környezeti károkat. Bemutattam a GIS-alapú modellel és az „Overlay” (rávetítéses) technológia segítségével szintetizált a statikus környezeti tényezőket (erdőállomány, domborzat) és a valós idejű meteorológiai változókat. A klímaváltozásnak leginkább kitett alföldi fenyevesekre és a városi-erdei érintkezési zónákra (WUI) fókuszáltam, ahol az emberi és természeti kockázatok halmozottan jelentkeznek. A megelőzés részben a biológiai és műszaki kockázatsökkentés új irányait elemeztem. Részletesen bemutattam a „zöld tűzgátak” (Green Firebreaks) koncepcióját, amely a gyűlékony fenyevesek lombos fafajokkal történő sávossal tagolásával gátolja a koronatűzek kialakulását és terjedését. A műszaki megoldások között kitértem a modern monitoring rendszerekre, összehasonlítva a különböző optikai és infravörös elven működő detektálási technológiákat, amelyekkel a riasztási lánc drasztikusan lerövidíthető. A végkövetkeztetés egy operatív döntéstámogató mátrix, amely az FWI (Fire Weather Index) értékeihez rendelve határoz meg konkrét hatósági és műveleti lépéseket. A bemutatott modell alkalmazása lehetővé teszi az erőforrások előzetes, célzott diszlokációját, növelve a védekezés költséghatékonyságát és az állomány biztonságát.

4. IRODALOMJEGYZÉK

- [1.] Radeloff, V. C. et al. (2005). The Wildland-Urban Interface in the United States. *Ecological Applications*, 15 (3), pp. 799–805.
- [2.] Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- [3.] Chuvieco, E. et al. (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and GIS. *Ecological Modelling*, 221 (1), pp 46-58.
- [4.] Rothermel, R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115. 1972.
- [5.] Agee, J. K., & Skinner, C. N. (2005). Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management*, 211, pp. 83–96.
- [6.] Ganteaume, A. et al. (2013). A review of the main driving factors of forest fire ignition. *Journal of Environmental Management*, 117, pp. 360–378.

- [7.] 2009. évi XXXVII. törvény az erdőről, az erdő védelméről és az erdőgazdálkodásról. [Online]. Elérhetőség: <http://net.jogtar.hu> (2026.02.16.)
- [8.] 4/2008. (VIII. 1.) ÖM rendelet az erdők tűz elleni védelméről. [Online]. Elérhetőség: <http://net.jogtar.hu> (2026.02.16.)
- [9.] 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról. [Online]. Elérhetőség: <http://net.jogtar.hu> (2026.02.16.)
- [10.] National Weather Service (2024). Red Flag Warning and Fire Weather Watches. NOAA. [Online]. Elérhetőség: https://www.weather.gov/lot/firewx_definition (2026.02.11)
- [11.] Country Fire Authority (2024). Total Fire Bans and Fire Danger Ratings. Victoria State Government. (Country Fire Authority (CFA): Total Fire Bans and Fire Danger Ratings. Victoria State Government; cfa.vic.gov.au,
- [12.] Météo-France (2024). La Météo des forêts: un nouvel outil pour la prévention des incendies
- [13.] Fernandes, P. M. (2013). Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landscape and Urban Planning*, 110 (1), pp. 175–182.
- [14.] Dimitrakopoulos, A. P., & Papaioannou, K. K. (2001). Flammability Assessment of Mediterranean Forest Fuels. *Fire Technology*, 37 (2), pp. 143–152.
- [15.] Curran, T. J. et al. (2019). Green Firebreaks as a Management Tool for Wildfires. *Journal of Environmental Management*, 233, pp 329–336.
- [16.] De Frenne, P. et al. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 3 (5), pp. 744–749.
- [17.] Hotspots Fire Project (2024). Understanding Fuel: Fuel Management Zones Fact Sheet. NSW Rural Fire Service. [Online]. Elérhetőség: <https://www.hotspotsfireproject.org.au/news/2024-12-20/understanding-fuel-fuel-management-zones-fact-sheet> (2026.02.07.)
- [18.] Agee, J. K. et al. (2000). The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. *Forest Ecology and Management*, 127, pp. 55–66.
- [19.] FAO Fire Management: Voluntary Guidelines. Fire Management Working Paper 17. Rome 2006.
- [20.] Rossi, J. L. et al. Fuelbreaks: a part of wildfire prevention. Contributing Paper to Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). 2019.)
- [21.] Insight Robotics (2026). Saving the world, bit by bit. [Online]. Elérhetőség: <https://www.insightrobotics.com/en/> (2026.02.24.)
- [22.] IQ FireWatch (2026). Korai erdőtüzek észlelése [Online]. Elérhetőség: <http://iq.firewatch.com> (2026.02.17)
- [23.] Alkhatib, A. A. A. (2014). A review on forest fire detection techniques. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 10 (3), 597368 [Online]. Elérhetőség: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2014/597368> (2026.02.22.)
- [24.] Arrue, B. C. et al. (2000). An intelligent system for false alarm reduction in infrared forest-fire detection. *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, 15 (3), pp. 64–73. 2000.)
- [25.] IQ FireWatch (2026). Korai erdőtüzek észlelése [Online]. Elérhetőség: <http://iq.firewatch.com> (2026.02.17)
- [26.] Paratronic ADELIE – Alarme Détection Localisation des Incendies [Online]. Elérhetőség: <https://www.paratronic.com/secteur-activite/detection-des-incendies/> (2026.02.01)

- [27.]National Weather Service (2024). Red Flag Warning and Fire Weather Watches. NOAA. [Online]. Elérhetőség: https://www.weather.gov/lot/firewx_definition (2026.02.11)
- [28.]Insight Robotics (2026). Saving the world, bit by bit. [Online]. Elérhetőség: <https://www.insightrobotics.com/en/> (2026.02.24.)
- [29.]Bosch Magyarország IoT Blog (2023). Mire vagy kíváncsi? [Online]. Elérhetőség: <https://iot.boschblog.hu/> (2026.02.12.)