

## FEKETE FENYVESEK TŰZVESZÉLYESSÉGI VISZONYAINAK ELEMZÉSE McARTHUR MODELLJÉVEL

CSERESNYÉS IMRE<sup>1</sup> ÉS CSONTOS PÉTER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Növényrendszertani és Ökológiai Tanszék  
1117 Budapest, Pázmány P. stny. 1/C.; e-mail: cseresnyes.imre@freemail.hu

<sup>2</sup>MTA-ELTE Ökológiai és Elméleti Biológiai Kutatócsoport  
1117 Budapest, Pázmány P. stny. 1/C.; e-mail: cspeter@ludens.elte.hu

**Kulcsszavak:** erdőtűz, fekete fenyő, időjárási tényezők, lángmagasság, szárazsági faktor, terjedési sebesség, tűzveszélyességi index, üszökvetési távolság

**Összefoglalás:** Magyarország területén a tájidegen fekete fenyő állományok fokozottan tűzveszélyes vegetációfűsnak tekinthetők, amit a Dunazug-hegység erdőtűzei is bizonyítanak. Az állományok tűzveszélyességét a bennük felhalmozódott éghető anyag mennyisége, a fennálló meteorológiai tényezők, valamint topográfiai viszonyok határozzák meg. A Dunazug-hegység telepített fekete fenyveseinek tűzveszélyességi viszonyait a McArthur-féle empirikus modell segítségével vizsgáltuk. A modell az éghető anyag mennyisége, a hőmérséklet, a relatív légnedvesség, a szélesebbesség, a lejtőszög és a szárazsági faktor ismeretében megadja a gyulladási valószínűségként értelmezhető tűzveszélyességi indexet (TVI), a lángmagasságot, a terjedési sebességet, valamint az üszökvetési távolságot. A szárazsági faktor aktuális értéke az utolsó csapadék mennyiségéből, a lehullása óta eltelt időből, valamint a Byram-Keetch szárazsági indexből (BKDI) számítható ki. Korábbi vizsgálatainkból tudjuk, hogy az éghető anyag mennyisége a 60–80 éves állományokban a legnagyobb, így ezek vannak leginkább kitéve az erdőtűzek pusztító hatásának. Emellett már meghatározásra kerültek a BKDI napi értékei az 1993–2002. közötti időszakra vonatkozóan. A BKDI adatok és a Budapest-Lőrinc meteorológiai állomáson 1993. és 2002. között rögzített napi csapadékmennyiségek alapján számoltuk ki a szárazsági faktor napi értékeit és éves változását. Megállapítottuk, hogy az átlagos szárazsági faktor januártól májusig 5-ös értéket mutat, június elején emelkedni kezd, maximumát (8-at) az augusztus-szeptemberi időszakban mutatja, majd folyamatos csökkenés után november végén 5-re áll vissza. A vizsgált időszak legaszályosabb éve (2000) során azonban a szárazsági faktor átlaga hat dekádban is elérte a maximális 10-et. Ezután vizsgáltuk, hogyan hatnak a különböző meteorológiai tényezők változásai a tűzveszélyességi viszonyokra. A hat tényezőtől (éghető anyag mennyisége, hőmérséklet, relatív légnedvesség, szélesebbesség, lejtőszög és szárazsági faktor) egyet-egyet bizonyos intervallumban változtattunk, és a többi öt tényezőt állandó értéken tartva vizsgáltuk ennek hatását a négyféle eredményre (tűzveszélyességi index, lángmagasság, terjedési sebesség és üszökvetési távolság). A kiválasztott állandó értékek a következők voltak: hőmérséklet 30 °C, relatív légnedvesség 30%, szélesebbesség 30 km/h, lejtőszög 30°, szárazsági faktor 10. Éghető anyagként a korábbi vizsgálatokból ismert 6 mm-nél kisebb avarfrakciók szerepeltek.

Eredményeink szerint a hőmérséklet, a szélesebbesség és a szárazsági faktor emelkedése növeli, míg a relatív légnedvesség növekedése csökkenti a tűzveszélyességi indexet, a lángmagasságot, a terjedési sebességet és az üszökvetési távolságot. Az éghető anyag mennyisége nem befolyásolja a tűzveszélyességi indexet, de növekedése elősegíti a tűz terjedését, és növeli a lángmagasságot. A tűz lejtőn felfelé mindig sokkal nagyobb sebességgel terjed, mint sík terepen vagy lefelé. A tűzveszélyesség a fent megállapított konstans paraméterek mellett (tehát egy átlagosnak számító nyári napon) is eléri a nagyon magas fokozatot (TVI=24), a lángmagasság a 60–80 éves állományokban 9,19 m, a terjedési sebesség lejtőn felfelé 4,19 km/h, az üszökvetési távolság 1,53 km. Szélsőséges időjárási helyzetek (37 °C, 16% relatív légnedvesség és 55 km/h szél) kialakulása esetén a tűzveszélyesség extrém mértékűre emelkedik (TVI=90), hasonlóan a közismerten tűzveszélyes mediterrán területekhez. A McArthur-modell megbízhatóságát szakirodalomból vett laboratóriumi kísérletek eredményeinek elemzésével vizsgáltuk, és megállapítottuk, hogy a modell segítségével kiszámított tűzveszélyességi jellemzők viszonylag jól megfelelnek a kísérleti adatoknak.

## Bevezetés

A kezdetben táj- és talajvédelmi, később gazdasági célokkal hazánk területén telepített feketefenyő (*Pinus nigra* Arn.) napjainkra természetvédelmi és gazdasági problémák okozójává vált. Árnyékoló hatásának, valamint felhalmozódó tűvarjának következtében a botanikailag értékes dolomitflóra elszegényedett, illetve lokálisan kipusztult (BÓDIS 1993, JÁRÓ 1996, CSONTOS et al. 1998, CSERESNYÉS et al. 2003, TAMÁS 2003). Emiatt az egykor gazdag flórájú sziklagyepek jelentős részének helyén *nudum*-típusú, monodomináns *Pinus nigra*-kultúrtársulást találunk (BORHIDI 1956, CSONTOS et al. 1996, HORÁNSZKY 1996). A feketefenyő esetleges eltávolítását követően is lassú az őshonos növényzet regenerálódása, mivel az állományok talajában eltöltött több évtizedet csak néhány faj magja képes átvészelni (CSONTOS et al. 1996, 1998).

A legsúlyosabb károkat azonban a fenyveseinkben gyakran pusztító erdőtüzek okozák (ZAMBÓ 1995, TAMÁS és CSONTOS 1995, 1998, TAMÁS 1997, 2001a). Több kontinensen kimutatták, hogy az erdőtüzek gyakorisága évtizedek óta folyamatosan növekszik (ZACKRISSON 1977, JOHNSON et al. 1990, MILLÁN et al. 1998, NIKLASSON és GRANSTRÖM 2000, HARTLEY 2002, PALIK et al. 2002), és ezek jelentős része emberi felelőtlenségre vagy szándékos gyújtogatásra vezethető vissza (JOHNSON és LARSEN 1991, GRANSTRÖM 1993, GELETA 1995, GHIMESSY 1995, VIEGAS et al. 1999).

Magyarország a meleg mérsékelt övben terül el, amely a mediterrán és a nedves szubtrópusi területek után erdőtüzek szempontjából a leginkább veszélyeztetett (TAMÁS 1997, 2001b). Aszályos nyarakon fokozott tűzveszéllyel kell számolnunk. Hazánkban a tüzek évente átlagosan 600–800 ha erdőt károsítanak vagy pusztítanak el, kiemelkedően kedvezőtlen, csapadékhiányos években azonban a leégett állományok területe a 2000 ha-t is meghaladhatja! Kizárólag a Pilisben és a Budai-hegységben az aszályosnak számító 1993–94-es években 50 erdőrészletben, 230 ha területen pusztított erdőtüz (ZAMBÓ 1995).

AGÓCS (1995) szerint az erdőtüzek okozta természeti károk közül a flóra és fauna pusztulása mellett kiemelendő a jelentős mértékű légszennyezés, valamint az „A” szint átégése és az agyagásványok degradálódása következtében fellépő talajerózió (de nem hanyagolható el az invazív növényfajok utólagos térhódítása sem).

Az állományok tűzveszélyessége a bennük felhalmozódott éghető anyag mennyiségétől, meteorológiai tényezőktől, valamint a terület topográfiai viszonyaitól függ (BUSSAY 1995, MILLÁN et al. 1998, VIEGAS 1998). A tűvar – lassú lebomlása miatt – nagy mennyiségben halmozódik fel a feketefenyvesek talaján (JÁRÓ 1996, KAVVADIAS et al. 2001, CSERESNYÉS et al. 2003, CSERESNYÉS 2004a), ezért a telepített feketefenyvesek a terület korábbi vegetációját alkotó sziklagyepeknél, valamint a hazai természetes erdő-típusoknál is sokszorosan tűzveszélyesebbek lehetnek.

A tűzveszély mértékére jelentős hatással van az avar és a növényzet szárazsága. Az átlagosnál szárazabb években a területet sújtó erdőtüzek gyakorisága és kiterjedése is növekszik (VIEGAS et al. 1990, 1992, GRANSTRÖM 1993, SWETNAM 1993). Magyarországon a szárazság szempontjából legkritikusabb az augusztus-szeptemberi időszak, mivel az avar és a felső talajréteg vízhiánya általában ekkor a legnagyobb (CSERESNYÉS 2004a, 2004b).

Tanulmányunkban (megfelelő tűzveszélyességi modell alkalmazásával) arra kerestünk választ, hogy milyen mértékű tűzveszéllyel kell számolnunk a különböző korú

és égtáji kitettségű állományokban. Célunk volt továbbá megállapítani, hogyan függenek a tűz jellemzői a meteorológiai tényezőktől, valamint, hogy milyen mértékű tűzveszélyességi helyzetek állhatnak elő extrém időjárási körülmények közepette. A modellezéshez a Dunazug-hegység dolomitvidékeire telepített feketefenyő állományokat használtuk fel.

### Anyag és módszer

A tűzveszélyességi modellek célja: meghatározott kiindulási adatok (éghető anyag mennyisége, meteorológiai és topográfiai viszonyok stb.) alapján előrejelezni a tűzveszély mértékét, és a tűz várható fő tulajdonságait.

A modellek kidolgozása az 1940-es években kezdődött, napjainkra mind az empirikus, mind az elméleti modellek száma meghaladja a harmincat (PASTOR et al. 2003). Több tucat számítógépes program is kidolgozásra került, melyek komplex topográfiai helyzetekben jósolják meg a tűznek és terjedésének jellemzőit (LOPES et al. 2002).

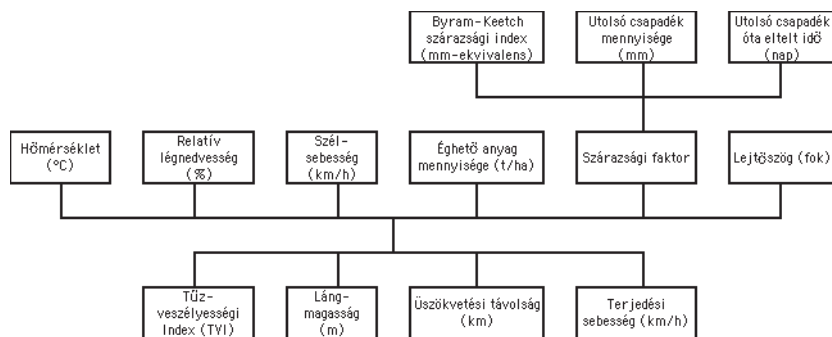
A tűzveszély mértékének jelzésére nagyszámú indexet dolgoztak ki, melyek közül Európában is többfélét használnak (VIEGAS et al. 1999). A kicsi adatigényű indexek rendszerint kevesebb információt szolgáltatnak. Ilyen pl. a Svédországban használt Angström-index, amely csak a levegő relatív páratartalmára és hőmérsékletére épül (BUSSAY 1995). Más mutatók (pl. az Európában és Amerikában alkalmazott *Fire Weather Index*) megbízhatóbbak és pontosabbak, viszont kiszámításuk jóval több adat ismeretét követeli meg (LOPES et al. 2002).

A. G. MCARTHUR 1966–67-ben dolgozta ki modelljének alapjait. Az empirikus modell több mint 800 tüzeset kiterjedt terepi vizsgálata alapján készült el, először új-dél-walesi legelőkre, valamint eukaliptusz-erdőkre (NOBLE et al. 1980). Később többször is átdolgozásra került, ilyen formában vált használatra alkalmassá európai és észak-amerikai lombos- és tűlevelű erdőkben egyaránt. Gyakorlati felhasználhatóságát tekintve az egyik legjobb modell, melyet ma is széles körben használnak Ausztráliában, Észak-Amerikában és Európa mediterrán területein is (PASTOR et al. 2003). Terepi tesztelését is sokhelyütt elvégezték, sőt tűzvédelmi technológiák kidolgozásához is felhasználták. Sajátos alkalmazása, hogy segítségével a tüzek előfordulási gyakoriságaiból hosszú időre visszamenőleg rekonstruálták az adott terület klímaviszonyainak jellemzőit és változásait (NOBLE et al. 1980). Használatos az erdők hosszú távú, tűzzel kapcsolatos dinamikájának jellemzésére is.

A modell legtöbb matematikai összefüggése egyszerű, könnyen linearizálható, jól illeszthető az empirikus adatokra. A kapott eredmények természetesen nem pontos értékek, hanem csak ésszerű becslések. A tűzveszélyességi index a tűzveszély mértékét inkább csak kvalitatív módon fejezi ki, a tűz viselkedéséről azonban némileg pontosabb eredményt kapunk.

Ahhoz, hogy a tűzveszélyességet és a tűz jellemzőit megkapjuk, szükségünk van a hőmérséklet, a relatív légnedvesség, a szélesebesség, a lejtőszög, az éghető anyag mennyisége és a szárazsági faktor ismeretére. A szárazsági faktor kiszámítása az utolsó csapadék mennyiségén, az azóta eltelt esőmentes napok számán, valamint az ún. Byram-Keetch-féle szárazsági index értékén alapul (CSERESNYÉS 2004b).

Mindezek ismeretében a modell megadja a tűzveszélyességi indexet, a láng magasságát, az üszökvetési távolságot és a tűz terjedési sebességét. A McArthur-modell felépítését az 1. ábra mutatja. A fent említett változókra kell először bővebben kitérnünk.



1. ábra A McArthur-féle tűzveszélyességi modell felépítése.  
Figure 1. Schematic diagram of the McArthur's model.

### 1. Hőmérséklet:

A modell a 2 m-es magasságban mért napi maximális hőmérsékletet veszi figyelembe °C-ban megadva. Fontos azonban megemlíteni, hogy a talajfelszín (ahol a tűzveszély forrását adó avarréteg elhelyezkedik) és a felette lévő légréteg hőmérséklete több fokkal is meghaladhatja a 2 m-es magasságban mért értéket mind a dolomitkopárokon, mind a telepített fenyvesek szegélyén és lokálisan kiritkult belső részein (DRASKOVITS és KOVÁCS-LÁNG 1968).

Az 1993–2002. közötti évek meteorológiai adataiból megállapítottuk, hogy Magyarországon a legmelegebb időszak augusztus első dekádja, azaz ekkor kell leginkább számolnunk a magas hőmérséklet hatásával (OMSZ 1993–2002, CSERESNYÉS 2004a, 2004b).

### 2. Relatív légnedvesség:

A levegő relatív páratartalmát %-ban kell megadni. A légnedvesség előrejelzése nagyon nehéz, mivel igen rövid idő (néhány óra) alatt képes óriási mértékű fluktuációkra. Napi periodikus változása is jelentős lehet. A havi átlagos légnedvesség júliusban a legalacsonyabb (41%), napi minimumát rendszerint 15 óra körül éri el (BACSÓ et al. 1953, BACSÓ 1958).

### 3. Szélsebesség:

A modell km/h-ban mért szélsebességgel számol. A szélsebesség (a relatív páratartalomhoz hasonlóan) nehezen jelezhető előre, térben és időben rendkívül változékony lehet. A domborzat jelentősen befolyásolja a szélviszonyokat. A legtöbb földrajzi régióban vannak olyan szél típusok, melyek igen tűzveszélyes helyzeteket teremthetnek. Ezek mindig száraz és erősen turbulens légáramlatok (MILLÁN et al. 1998).

A szél a lejtőszög mellett fontos faktor a koronatűz kialakulása és terjedése szempontjából is, mivel a lombkorona sokkal inkább ki van téve a szél hatásának, mint a talaj közeli vegetáció és a lehullott avar (VIEGAS 1998).

Hátszél esetén a tűz terjedésének sebessége a  $V = V_0(1 + w)$  egyenlet szerint növekszik, ahol  $V_0$  a sík terepen, szélcsendben mért terjedési sebesség,  $w$  a szélsebességtől függő faktor (SIMEONI et al. 2001). A gyorsabb terjedés oka, hogy csökken a lángnyelv

talajjal bezárt szöge, így a láng okozta hőszugárzás hatékonyabban képes előmelegíteni a tűzfront előtt lévő éghető anyagot (az elméletet SIMEONI és mtsai. *Pinus pinaster* avarrétegen laboratóriumi kísérletekkel is igazolták). A széllel szemben történő terjedés sebessége megegyezik a szélcsendben tapasztalttal (VIEGAS et al. 1994).

Magyarországon a június és a július a két legszelebb hónap (BACSÓ et al. 1953, BACSÓ 1958). Átlagos napokon 12–15 óra között mérhető a legnagyobb szélesebbesség, de ez az időjárás helyzettől függően nagymértékben variálhat (BARTHOLY és RADICS 2000). A Dunántúli-középhegység (ezen belül is főként a Dunazug-hegység) hazánk legszelebb területeinek egyike. A Pilisvörösvári-árok szélcsatornaként engedi be az északnyugati szeleket (LOVÁSZ és MAJOROS 1997).

A dolomitvidékekre a meredek hegyoldalak és a kiálló, éles gerincek jellemzők. Ezen a területeken fokozottan kell számolnunk erős, sokszor viharos széllelkésekkel még a viszonylag csendes időjárású napokon is.

#### 4. Lejtőszög:

A lejtőszög és a szélesebbesség hatása között sok hasonlóság figyelhető meg. Ha a tűz a hegyoldalon felfelé terjed, a terjedési sebesség nő a lejtőszöggel a  $V=V_0(1 + \dots)$  összefüggés szerint, ahol  $\dots$  a lejtőszögtől függő tényező (SANTONI és BALBI 1998). A szélesebbesség és a lejtőszög egymástól függetlenül gyorsítja a tűz terjedését, ekkor a  $V=V_0(1 + \dots + \dots)$  összefüggés írható fel (VIEGAS és NETO 1991). A lejtőszög hatása szintén a láng talajjal bezárt szögének csökkenésén keresztül valósul meg. Lejtőn lefelé a tűz ugyanolyan sebességgel terjed, mint sík terepen, a lejtőszögnek ilyenkor nincs szerepe (VIEGAS 1998). A leírtakat MORANDINI és mtsai. (2001) kísérleti körülmények között is igazolták. A lejtőszög növeli a láng magasságát és a koronatűz kialakulásának esélyét is (SANTONI és BALBI 1998). A dolomitterületeken gyakoriak a meredek lejtők, ezért a lejtőszög tűzveszélyt növelő hatásai fokozottan érvényesülnek.

#### 5. Az éghető anyag mennyisége:

Mivel a modell a 6 mm-nél kisebb éghetőanyag-frakcióval számol, és a koronatűzzel nem foglalkozik, éghető anyagként a 6 mm-nél kisebb avarfrakció szerepel. Erre vonatkozóan a feketefenyves állományok négy korosztályára nézve rendelkezünk adatokkal. A 20–35 éves állományokban 10574 kg/ha, a 35–60 évesekben 14024 kg/ha, a 60–80 évesekben 18564 kg/ha, a 80 évesnél idősebbekben pedig 13056 kg/ha a 6 mm-nél kisebb avarfrakció mennyisége (CSERESNYÉS 2004a). Mivel az éghető anyag mennyisége a 60–80 éves állományokban a legnagyobb, így a leginkább tűzveszélyesnek az ilyen korú erdők tekinthetők.

A tűzgyulladás valószínűsége független az éghető anyag mennyiségétől, de a lángmagasság, a terjedési sebesség és az üszökvetési távolság növekszik az avar tömegének emelkedésével. MORVAN és DUPUY (2001) kísérletekkel támasztották alá, hogy a terjedési sebesség kezdetben lineárisan növekszik az éghető anyag mennyiségének növekedésével, majd 20 t/ha körüli avarmennyiségnél telítődést mutat.

#### 6. Szárazsági faktor:

A szárazsági faktor a növényzet, az avar, valamint a felső talajréteg szárazságának mértékét jelzi, értéke 0–10-ig terjedő egész szám lehet. Az utolsó csapadék mennyiségéből és idejéből, valamint a Byram-Keetch szárazsági index értékéből számítható (1. ábra).

A szárazság a tűzveszély egyik kulcseleme. Az avar nedvességtartalmának növekedésével lineárisan csökken a tűz terjedési sebessége, melynek oka a gyulladáshoz szükséges idő növekedése. (VIEGAS et al. 1990, VIEGAS és NETO 1991).

Ha az avar nedvességtartalma meghaladja a 20%-ot, a tüzesetek száma, valamint a leégett területek nagysága is jelentősen csökken (VIEGAS 1998). A nagy tüzesetek szinte mindig 10% alatti nedvességtartalomhoz kötődnek. Ha a nedvességtartalom 35–40% fölé emelkedik, a tűz terjedése megszűnik, és a tűz kialszik. Ez az ún. kioltási nedvességtartalom. Már néhány mm csapadék is jelentősen megemelheti az elhalt szerves anyagok nedvességtartalmát, ezzel nagymértékben csökken a tűz kialakulásának valószínűsége az elkövetkező néhány napra nézve.

Az európai erdők a nyári és őszi hónapokban a legszárazabbak. Ráadásul ekkor a legnagyobb az antropogén tüzek gyakorisága is (a megnövekedett turizmus, természetjárás és egyéb szabadidő tevékenységek miatt).

Magyarországon az augusztus-szeptember közötti időszak tekinthető a legszárazabbnak (CSERESNYÉS 2004a, 2004b). Az átlagos évi talajnedvesség szempontjából a Duna-zug-hegység az egyik legszárazabb hazai hegy- és dombvidékek közül (DUNKEL et al. 1990). Az alapközet is nagymértékben befolyásolja a terület vízháztartását és kiszáradásának ütemét (EBERHARDT és LATHAM 2000).

Az eredményként kapott tűzveszélyességi index (a továbbiakban: TVI) a gyulladás valószínűségét fejezi ki a fennálló körülmények esetén. A TVI verbalizált fokozatai a következők: 0–4: alacsony; 5–11: közepes; 12–23: magas; 24–49: nagyon magas; 50 felett: extrém.

A lángmagasságot m-ben, a terjedési sebességet km/h-ban kapjuk meg.

Az üszökvetési távolság az a km-ben megadott legnagyobb távolság, ameddig az égés során keletkező, izzó, parázsló anyag képes légi úton eljutni. Ennek következtében van lehetőség arra, hogy akár nagy távolságban is keletkezessenek új tűzfészkek, ami rendkívül megnehezítheti a védekezést, és jelentősen emelheti a leégett terület nagyságát.

Ahogy az 1. ábra mutatja, a szárazsági faktor kiszámításához a Byram-Keetch szárazsági index (Byram-Keetch Drought Index=BKDI), valamint az utolsó csapadék mennyisége és ideje szükséges. A BKDI az avar- és talajréteg felső 200 mm-ének mm-ekvivalensben kifejezett csapadékhiánya (KEETCH és BYRAM 1968).

A BKDI-t korábban már meghatároztuk 1993–2002. időszak minden egyes napjára, a Budapest-Lőrinc meteorológiai mérőállomáson (N 47°25'45''; E 19°10'56''; 138,1 m) rögzített napi maximális hőmérsékletek és csapadékmennyiségek felhasználásával (OMSZ 1993–2002, CSERESNYÉS 2004a, 2004b). Ezek ismeretében a 10 éves periódus minden napjára végigszámoltuk a szárazsági faktort a „Drought Factor Calculator” program segítségével, olyan módon, hogy megadtuk az adott napra már kiszámolt BKDI-t, majd visszakerestük az utolsó nettó csapadék mennyiségét és ennek idejét napokban (nettó csapadék alatt a mért bruttó csapadék és az 5 mm-es intercepció különbsége értendő; KEETCH és BYRAM 1968). A naponkénti szárazsági faktorokat azután napi dekádoként átlagoltuk, és a legcsapadékosabb, valamint a legaszályosabb évekre ábrázoltuk. Emellett minden dekádra kiszámoltuk a 10 év átlagát és feltüntettük ennek változását is.

A szárazsági faktor évi változásának ismerete igen fontos információ a tűzveszélyesség modellezése szempontjából. Egyrészt megállapítható belőle, hogy az év mely részében kell számítanunk a legnagyobb szárazságra, tehát melyik az év legtűzveszélyesebb időszaka. Másrészt a TVI és a tűz jellemzőinek ismeretéhez meg kell adni a szárazsági faktort, mint a modell egyik bemenő paraméterét. A görbe alapján tudhatjuk meg,



milyen szárazsági faktoriall kell számolnunk valójában az átlagosnak mondható, valamint az aszályos évek kritikus időszakaiban.

Az előbbiekben részletesen megtárgyaltuk azokat a tényezőket, amelyekről a tűzveszélyességi index és a tűz jellemzői függenek (1. ábra). Meg kell vizsgálnunk, hogyan hat a különböző meteorológiai tényezők változása a tűzveszélyességi viszonyokra.

Ennek bemutatásához a hat tényező közül egyet-egyét kiválasztva, értékét bizonyos intervallumban változtattuk, mialatt a többi öt tényezőt állandó értéken tartottuk, és ennek hatását a négyféle eredményre (tűzveszélyességi index, lángmagasság, üszökvetési távolság, terjedési sebesség) grafikonokon ábrázoltuk.

Az alkalmazott konstans értékek és a változtatás intervallumai a következők:

1. Hőmérséklet: Konstans értékét 30 °C-nak választottuk, mivel a leginkább tűzveszélyes nyári időszakban ez a hőmérséklet gyakran fennáll. Budapest környékén a hőségnapok száma (amelyeken a napi maximum hőmérséklet eléri a 30 °C-ot) évente átlagosan 20, de ennél jóval több is lehet (KAKAS 1960). Amikor a hőmérséklet volt a változtatandó tényező, akkor értékeit 0–40 °C-ig terjedő intervallumban vettük figyelembe.

2. Relatív páratartalom: Konstans értékét 30%-nak választottuk. Az OMSZ adatai alapján a júliustól szeptemberig tartó időszakban 18–20%-os gyakorisággal fordul elő ilyen vagy ennél alacsonyabb páratartalom, tehát egy átlagos nyári napon ez az érték ésszerűnek tűnik. A változtatás intervalluma 0–100%-ig terjedt.

3. Szélsebesség: Konstans értéke 30 km/h. Ez a Beaufort-Köppen-skála szerint élénk szelet jelent. Ilyen erősségű szél az év minden szakában nagy gyakorisággal előfordul, különösen a hegytetőkön és a gerinceken (BARTHOLY és RADICS 2000). A változtatás 0–70 km/h-ig terjedt, tehát a szélcsendtől a viharig lefedte a szélerősséget.

4. Lejtőszög: A lejtőszöget 30°-nak választottuk, mely jellemző a dolomitvidékeken. Értékét nem változtattuk. A grafikonokon minden esetben csak a lejtőn felfelé kapott terjedési sebességet tüntettük fel (a 30°-os lejtőszög megadásával). Mivel a lefelé terjedési sebessége a sík terepen megfigyelhető terjedési sebességgel azonos (VIEGAS és NETO 1991, VIEGAS 1998), ennek felvételekor a modellbe 0°-os lejtőszöget írtunk be.

5. Az éghető anyag mennyisége: Ide a korábban már említett értékeket írtuk a különböző korcsoportok esetén.

6. Szárazsági faktor: Konstans értéknek a maximális 10-et választottuk, szintén számításaink végeredményei alapján, melyekből kiderült, hogy ilyen mértékű szárazság hosszabb ideig fennállhat az aszályosabb években, de még az átlagos időjárású években is előfordul (CSERESNYÉS 2004b). A változtatás intervalluma 0–10-ig terjedt, tehát a teljes skálát lefedte.

A kapott eredményeket összehasonlítottuk a szakirodalomban leírtakkal, melyeket kísérletes úton nyertek. Ezáltal némileg tesztelhetjük a modell megbízhatóságát és gyakorlati alkalmazhatóságát is azon felül, hogy konkrét adatokkal szolgálhattunk a Duna-zug-hegység feketefenyves állományainak tűzveszélyességéről.

Az előzőekben leírt konstansok mindegyike egy „átlagos” nyári napra vonatkozik. 30 °C maximum hőmérséklet, 30 km/h szél és 30% relatív páratartalom viszonylag gyakran előfordul a nyári időszak folyamán. Ritkábban azonban kialakulhatnak szélsőséges időjárási helyzetek, amelyek nagymértékben megnövelik a tűzveszélyességet. Egy ilyen extrém helyzetet is megvizsgáltunk. A választott értékek az alábbiak voltak:

1E. Hőmérséklet: 37 °C. Nyáron esetenként előfordul ilyen magas hőmérséklet, fő-

ként a napsütötte, déli erdőszegélyek talajközeli légrétegeiben (DRASKOVITS és KOVÁCS-LÁNG 1968).

2E. Relatív páratartalom: Igen meleg, száraz napokon a relatív páratartalom 16–17%-ra is lecsökkenhet (BACSÓ et al. 1953, BACSÓ 1958). Ebből kiindulva a modellezéshez 16%-ot használtunk.

3E. Szélsebesség: 55 km/h. A Beaufort-Köppen-skálán ez a szél viharos erősségű. Budapest környékén évente átlagosan 58 nap van, amikor a legerősebb szellökések eléri vagy meghaladják ezt a sebességet; ebből 7 nap esik júliusra, 5 augusztusra és 4 szeptemberre (BACSÓ et al. 1953). Évi átlagban mintegy 20 napon a szélsebesség a 75 km/h-t is elérheti.

4E. Lejtőszög: Mivel 30°-osnál meredekebb lejtőkkel is találkozhatunk a dolomit-területeken, ezúttal 40°-os lejtőszöget használtunk.

5E. Az éghető anyag mennyisége: A mintaterületeken korábbi vizsgálataink során mért legnagyobb avarmennyiséget szerepeltettük (CSERESNYÉS 2004a).

6E. Szárazsági faktor: Maximális értékével (10) számoltunk.

A felsorolt adatok felhasználásával is kiszámítottuk a TVI-t és a tűz jellemzőit, rámutatva ezzel az extrém helyzetek jelentőségére.

A 3–18. ábra a mellékletben található

### **Eredmények és értékelésük**

A BKDI adatok és a csapadékmennyiségek alapján számoltuk ki a szárazsági faktor napi értékeit és évi változását. A 2. ábrán 10 év átlaga mellett külön ábrázoltuk a legszárazabb és a legcsapadékosabb évet is.

A 10 évre vonatkozó átlagos szárazsági faktor januártól májusig egyenletesen 5-ös érték, emelkedése június elején indul meg. Maximumát (8-at) augusztus közepétől szeptember közepéig mutatja, majd fokozatos csökkenést követően november végén 5-re áll vissza. Tehát az év legszárazabb időszaka általában augusztus-szeptember. (Hasonló eredményre jutottunk a BKDI számítása kapcsán; CSERESNYÉS 2004a, 2004b)

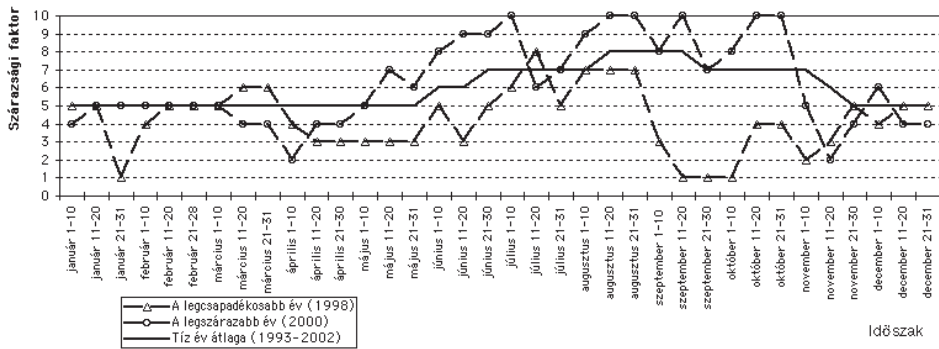
A legszárazabb év (2000) során a szárazsági faktor átlaga 6 dekádban is elérte a maximális 10-et (2. ábra). Ez a maximális szárazság 2000-ben összesen 83 napon állt fenn, először június 22-én, utoljára november 4-én. A leghosszabb egybefüggő 10-es szárazsági faktorú időszak augusztus 7. és szeptember 2. között volt (27 napon át). A legcsapadékosabb évben (1998) a szárazsági faktor egyetlen napon sem emelkedett 10-re, maximális 9-es értéke is csak az év 3 napjára (július 19–21.) korlátozódott.

Az adatokból látható, hogy a Dunazug-hegységben az erősen csapadékhányos években számítanunk kell arra, hogy a szárazsági faktor tartósan eléri a maximális értéket (főként augusztus-szeptemberben, de akár a nyár eleji vagy a késő őszi időszakban is).

A Dunazug-hegység egyik legnagyobb erdőtüze 1993. augusztus 15-én pusztított a Pilisszentiván és Nagykovácsi között emelkedő Zsíros-hegyen (ZAMBÓ 1995). A tűz napjára kiszámolt BKDI meglehetősen magas, 80,25 mm-ekvivalens (CSERESNYÉS 2004a), a szárazsági faktor pedig a maximálisához közeli 9 volt. Az adatok jól mutatják a kérdéses napon uralkodó szárazsági viszonyokat, nem beszélve arról, hogy a napi hőmérséklet 33 °C-ig emelkedett aznap (OMSZ 1993–2002), tovább növelve a tűzveszélyt.

A McArthur-modell által szolgáltatott eredményeket a melléklet 3–18. ábrái foglal-





2. ábra A szárazsági faktor évi változása dekádok szerint 10 év (1993–2002) átlagaként, valamint a legcsapadékosabb (1998) és a legszárazabb (2000) évben.

Figure 2. Annual changes of the mean value of drought factor as the average of years between 1993 and 2002, as well as in the wettest year (1998) and in the most droughty year (2000).

ják össze. A tűzveszélyességi index és a tűz jellemzőinek számítása során nem foglalkoztunk külön a 80 évesnél idősebb állományokkal, mivel egyrészt az ilyen korú monodomináns feketefenyvesek ritkák, másrészt a bennük felhalmozódott éghető anyag mennyisége statisztikai számításaink szerint lényegében megegyezik a 35–60 éves korosztályéval (CSERESNYÉS et al. 2003, CSERESNYÉS 2004a).

A környezeti tényezők hatását a TVI alakulására a 3–6. ábrák mutatják (a korcsoportokat nem jelöltük külön, mivel a TVI független az éghető anyag mennyiségétől, s így az állomány korától is). A hőmérséklet emelkedése növeli a TVI értékét (3. ábra). A korábban leírt konstans paraméterek mellett már 10 °C-os hőmérsékletnél magas (TVI=12), 30 °C-nál pedig nagyon magas (TVI=24) tűzveszélyességgel kell számolnunk. A relatív légnedvesség szintén fontos tényező a tűzveszélyesség szempontjából (4. ábra). 30%-nál alacsonyabb értéke nagyon magas tűzveszélyességet eredményez (TVI=24), növekedésével a TVI gyorsan csökken, de még 50% relatív humiditásnál is magas a tűzveszélyesség (TVI=12). A szélsebesség emelkedése egyre nagyobb mértékben növeli a TVI-t (5. ábra). A választott konstansok mellett már szélcsend esetén is magas a tűzveszélyesség, 60 km/h felett pedig már extrém mértékűre növekszik. A TVI lineárisan emelkedik a szárazsági faktorról (6. ábra). Az év bármely szakában kialakulhat 5-ös szárazsági faktor (2. ábra), amely már magas tűzveszélyességet eredményez; 10-es szárazsági faktornál (ami a nyári és őszi hónapokban gyakori lehet) pedig nagyon magas tűzveszélyességgel számolhatunk.

A lángmagasság a hőmérséklet (7. ábra) és a szélsebesség (9. ábra) növekedésével egyre meredekebben, a szárazsági faktor emelkedésével (10. ábra) pedig egyenesen növekszik. A relatív humiditás növekedése csökkenti a lángmagasságot (8. ábra). A lángmagasság növekszik az éghető anyag mennyiségével, tehát a legkisebb lángmagasság a 20–35, a legnagyobb pedig a 60–80 éves állományokban tapasztalható. A meteorológiai változók és a lejtőszög konstans tartásával, maximális (10-es) szárazsági faktor esetén a 20–35 éves állományokban 4,22 m, a 35–60 évesekben 6,70 m, a 60–80 évesekben pedig 9,19 m lángmagasság várható (10. ábra). A meteorológiai tényezők

közül leginkább a szélesebségnek van hatása a lángmagasságra (9. ábra). A leginkább tűzveszélyes, 60–80 éves állományokban 70 km/h sebességű szélleökések esetén a lángmagasság megközelíti a 20 m-t, de még a legfiatalabb állományokban is 10 m fölé emelkedik.

Az üszökvetési távolság szintén növekszik az éghető anyag mennyiségével, azaz a 20–35 éves állományokban kell a legkisebb, a 60–80 évesekben pedig a legnagyobb üszökvetési távolsággal számolnunk (11–14. ábra). Az üszökvetési távolság a hőmérséklettel gyorsuló ütemben növekszik (11. ábra), értéke még viszonylag alacsony hőmérséklet esetén is számottevő lehet, a 60–80 éves fenyvesekben 30 °C mellett pedig az 1,5 km-t is meghaladja. A relatív humiditás növekedésével gyorsan csökken az üszökvetési távolság (12. ábra). A 60–80 év közötti állományokban 20% relatív légnedvességnél kb. 2,3 km távolsággal kell számolnunk, de ez az érték 70% légnedvesség felett 0-ra csökken. A legfiatalabb állományokban már 60% relatív humiditásnál sincs számottevő üszökvetés. Az üszökvetési távolságot azonban leginkább a szélesebség befolyásolja (13. ábra). A legtűzveszélyesebb korcsoportban már szélcsend esetén is közel 0,6 km az üszökvetési távolság, de 70 km/h sebességű szélleökések az izzó anyagot akár 4,5 km-re is eljuttathatják. Ez rendkívül megnehezíti a tűz elleni védekezést, mivel igen nagy távolságokban is kialakulhatnak lokális tűzfészkek. Ehhez természetesen a később tárgyalásra kerülő nagy lángterjedési sebesség is hozzájárul. A szárazsági faktor emelkedése is növeli az üszökvetési távolságot (14. ábra). Amennyiben a szárazsági faktor értéke 2, vagy annál alacsonyabb, nem kell számítani üszökvetésre (a 20–35 éves fenyvesekben még 3-as szárazsági faktornál sem). Ennél nagyobb mértékű szárazság esetén azonban az üszökvetési távolság egyenletesen emelkedik, és a 60–80 éves erdőkben eléri az 1,5 km-t.

A tűz terjedési sebessége (a lángmagassághoz és az üszökvetési távolsághoz hasonlóan) növekszik az éghető anyag mennyiségével, tehát a 20–35 éves állományokban a legalacsonyabb, a 60–80 évesekben pedig a legmagasabb. A tűz felfelé mindig nagyobb sebességgel terjed, mint lefelé vagy sík területen; 30°-os lejtőszög mellett felfelé kb. 8-szor akkora terjedési sebességet kaptunk, mint lefelé. A terjedési sebesség alakulását bemutató grafikonokon (15–18. ábra) csak a felfelé terjedés sebességét tüntettük fel. A hőmérséklet egyre meredekebben növeli a terjedési sebességet (15. ábra). A 60–80 éves állományokban, egy 35 °C-os nyári napon felfelé közel 5 km/h terjedési sebesség állhat elő. A relatív humiditással gyorsan csökken a terjedési sebesség (16. ábra). A legtűzveszélyesebb korcsoportban, 20% relatív légnedvességnél például felfelé közel 6 km/h-val terjednek a lángok, de a légnedvesség 70%-ra emelkedésével ez mindössze 1 km/h-ra csökken. A terjedési sebességet is leginkább a szélesebség növeli (17. ábra). Felfelé a 60–80 éves állományokban már 40 km/h szélnél is több mint 5 km/h, 70 km/h szélesebségnél több mint 10 km/h a terjedési sebesség. A szárazsági faktoral a terjedési sebesség egyenletesen emelkedik (18. ábra). Amennyiben a szárazsági faktor 0, a terjedési sebesség is 0. A legmagasabb szárazsági faktor esetén a legtűzveszélyesebb állományokban a terjedési sebesség felfelé 4,19 km/h. A lefelé terjedés sebessége az alkalmazott paraméter-kombinációk egyikénél sem haladta meg az 1,35 km/h-t.

Felmerülhet a kérdés, hogy a modell eredményei mennyire közelítik a valóságot. Ennek megválaszolására néhány kísérlet eredményét használjuk, melyek a nemzetközi szakirodalomból ismertek.

VIEGAS és mtsai. (1994) kísérletesen igazolták, hogy a lefelé történő terjedés sebessége a lejtőszögtől független, és azonos a plató helyzetben mérhetővel. Felfelé terjedésnél a terjedési sebesség egyre nagyobb ütemben emelkedik a lejtőszög növekedésével. A 30°-os lejtőszögnél mért terjedési sebesség 4–6-szorosa a sík terepen megfigyelhetőnek, ami kisebb különbség, mint a McArthur-modell szerinti. MORANDINI és mtsai. (2001) szerint, ha a tűz 30°-os lejtőszög mellett felfelé terjed, akkor a terjedési sebesség 8–10-szerese a vízszintes terepen mérhető sebességnek. Az égetéses kísérletet *Pinus pinaster*-tűvar felhasználásával, laboratóriumi körülmények között végezték. Eredményeikkel szinte teljesen megegyező az általunk kapott 7,8–8-szoros különbség, amely a két sebesség között fennáll. Más kísérleti körülmények között ennél valamivel kisebb, 6–7-szeres különbséget észleltek (SANTONI és BALBI 1998).

Hasonló kísérletben vizsgálták a szélesebbesség hatását a lángok terjedésére (SIMEONI et al. 2001). A szélesebbesség emelésével a terjedési sebesség nagyobb mértékű növekedését kapták, mint a McArthur-modell szerinti értékek. Ennek alapján a modell talán kissé alulbecsli a szél hatását a terjedési sebességre.

MORVAN és DUPUY (2001) az éghető anyag tömegét változtatva mérte a terjedési sebességet. Saját eredményeink szerint, ha az éghető anyag tömege 10574 kg/ha-ról (20–35 éves állományok) 18564 kg/ha-ra (60–80 éves állományok) emelkedik (vagyis mintegy 75%-kal megnő), akkor a terjedési sebesség kb. 1,8-szeresére nő. MORVAN és DUPUY (2001) kísérleteik során, hasonló avar mennyiségek alkalmazásakor 1,5–1,6-szeres különbségeket találtak, tehát a modell ehhez képest kismértékben ugyan, de felülbecsli az éghető anyag tömegének hatását a terjedési sebességre.

A kísérletekből látható, hogy a McArthur-modell eredményei egyes esetekben elég pontosan megfelelnek a kísérleti adatoknak, máskor kisebb-nagyobb mértékben eltérnek azoktól. Részletesebb összehasonlítást nem tudunk tenni, hiszen a kísérletek során nem kerültek publikálásra a relatív humiditások, a léghőmérsékletek, de bizonyos esetekben az avar nedvességtartalma és mennyisége sem.

A korábban leírt eredményekből is látható, hogy egy „átlagos” nyári napon (a választott konstans paraméterekkel) is nagyon magas (TVI=24) tűzveszélyesség áll fenn. Szélsőséges időjárási viszonyok között – azaz 37 °C hőmérséklet, 16% relatív humiditás, 55 km/h szélesebbesség és 10-es szárazsági faktor esetén – a TVI értéke 90, amely messze meghaladja az extrém tűzveszélyességi fokozat alsó határát (TVI=50). Egy ilyen szélsőséges napon, az általunk mért legnagyobb avar mennyiség figyelembevételével (21272 kg/ha, Fehér-hegy 61 éves állománya; CSERESNYÉS 2004a) a kialakult tűz lángmagassága meghaladja a 30 m-t, az üszökvetési távolság kb. 7,5 km, a tűz terjedési sebessége pedig egy 40°-os lejtőn a 30 km/h-t is elérheti abban az esetben, ha a szél hátulról éri! Széllel szemben vagy szélcsendben ez az érték 9,9 km/h-ra, a lángmagasság 11,2 m-re csökken.

Az ilyen forró, száraz nyári napokon csak a legkritikább esetben kell ekkora széllel számolnunk, de 30 km/h szél esetén még mindig extrém mértékű tűzveszélyességet (TVI=50), közel 20 m-es lángmagasságot, 4 km-es üszökvetési távolságot, valamint felfelé 20 km/h terjedési sebességet kapunk.

Mindezekből jól látható, hogy nemcsak a mediterrán területeken kell komoly tűzveszélyre számítanunk, hanem hazai feketefenyveseinkben is. Ezért fokozott figyelmet kell fordítanunk ezekre az állományokra a kritikusnak számító száraz, meleg nyarakon annak érdekében, hogy a jelentős természeti és gazdasági károkkal járó tüzeket megelőzhessük.

### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk Bózsing Erikának a terepmunka elvégzésében nyújtott segítségéért és hasznos tanácsaiért. Bakon Gábor erdészvezető (Pilisi Parkerdő Rt. Budapesti Erdészete), Apatóczy István (Budakeszi Erdészet) és Farkas Viktor (Pilissszentkereszti Erdészet) az erdőállományokra vonatkozó adatgyűjtésben nyújtottak segítséget. Tamás Júlia lektornak, a kéziratához fűzött jobbító megjegyzéseierért, észrevételeierért mondunk hálás köszönetet. Munkánkat az OTKA (T-037732) támogatásával végeztük.

### Irodalomjegyzék

- AGÓCS J. 1995: Az erdő égetése. Erdészeti Lapok 130: 153.
- BACSÓ N. 1958: Budapest és környékének éghajlata. In: PÉCSI M. (szerk.): Budapest természeti képe. Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 355–418.
- BACSÓ N., KAKAS J., TAKÁCS L. 1953: Magyarország éghajlata. Országos Meteorológiai Intézet, Budapest.
- BARTHOLY J., RADICS K. 2000: A szélenergia hasznosítás lehetőségei a Kárpát-medencében. Egyetemi Meteorológiai Füzetek 14, ELTE, Budapest.
- BÓDIS J. 1993: A feketefenyő hatása nyílt dolomitsziklagyepre. Texturális változások. Bot. Közlem. 80: 129–139.
- BORHIDI A. 1956: Feketefenyveseink társulási viszonyai. Bot. Közlem. 46: 275–285.
- BUSSAY A. 1995: Az erdőtüz és a meteorológiai tényezők közötti kapcsolatok. Erdészeti Lapok 130: 149.
- CSERESNYÉS I. 2004: Dolomitra telepített feketefenyvesek avarproduktumának és tűzveszélyességének vizsgálata. Egyetemi szakdolgozat, ELTE, Budapest.
- CSERESNYÉS I., BÓZSING E., CSONTOS P. 2003: Erdei avar mennyiségének változása dolomitra telepített feketefenyvesekben. Természetvédelmi Közlemények 10: 37–49.
- CSONTOS P., HORÁNSZKY A., KALÁPOS T., LÓKÖS L. 1996: Seed bank of *Pinus nigra* plantations in dolomite rock grassland habitats, and its implications for restoring grassland vegetation. Anns hist.-nat. Mus. natn. hung. 88: 69–77.
- CSONTOS P., TAMÁS J., KALÁPOS T. 1998: A magbank szerepe a dolomittövényzet regenerálódásában korábban feketefenyvessel borított területeken. In: CSONTOS P. (szerk.): Sziklagyeppek szünbotanikai kutatása. Scientia Kiadó, Budapest, pp. 183–196.
- DRASKOVITS R., KOVÁCS-LÁNG E. 1968: Mikroklímamessungen in Kalkstein- und Dolomittelsenrasen. Ann. Univ. Sci. Budapest Sect. Biol. 9–10: 115–129.
- DUNKEL Z., STOLLÁR A., SZABÓ T., TIRINGER Cs. 1990: A területi párolgás meghatározása Magyarországon. Időjárás 94: 149–155.
- EBERHARDT R. W., LATHAM R. E. 2000: Relationships among vegetation, surficial geology and soil water content at the Pocono mesic till barrens. Journal of the Torrey Botanical Society 127: 115–124.
- GELETA F. 1995: Erdőtüzek okainak hatásvizsgálata. Erdészeti Lapok 130: 150.
- GHIMESSY L. 1995: Erdőtüzek és azok hatása erdeinkre. Erdészeti Lapok 130: 150–151.
- GRANSTRÖM A. 1993: Spatial and temporal variation in lightning ignitions in Sweden. Journal of Vegetation Science 4: 737–744.
- HARTLEY M. J. 2002: Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forest. Forest Ecology and Management 155: 81–95.
- HORÁNSZKY A. 1996: Növénytársulástani, erdőgazdálkodási és természetvédelmi kérdések a Kis- és Nagy-Szénáson. Természetvédelmi Közlemények 3–4: 5–19.
- JÁRÓ Z. 1996: Ökológiai vizsgálatok a Kis- és Nagy-Szénáson. Természetvédelmi Közlemények 3–4: 21–53.
- JOHNSON E. A., FRYER G. I., HEATHCOTT M. J. (1990): The influence of man and climate on frequency of fire in the interior wet belt forest, British Columbia. Journal of Ecology 78: 403–412.
- JOHNSON E. A., LARSEN C. P. S. (1991): Climatically induced change in fire frequency in the southern Rockies. Ecology 72: 194–201.
- KAKAS J. (szerk.): 1960 Magyarország éghajlati atlasza. Országos Meteorológiai Intézet. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- KAVVADIAS V. A., ALIFRAGIS D., TSIONTSIS A., BROFAS G., STAMATELOS G. 2001: Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. Forest Ecology and Management 144: 113–127.
- KEETCH J. J., BYRAM G. M. 1968: A Drought Index for Forest Fire Control. U.S.D.A. Forest Service Research Paper SE-38. Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC.

- LOPES A. M. G., CRUZ M. G., VIEGAS D. X. 2002: FireStation – an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environmental Modelling & Software* 17: 269–285.
- LOVÁSZ GY., MAJOROS GY. 1997: Magyarország természeti földrajza I. University Press, Pécs.
- MILLÁN M. M., ESTRELA M. J., BADENAS C. 1998: Synoptic analysis of meteorological processes relevant to forest fire dynamics on the Spanish mediterranean coast. In: MORENO J. M. (ed.): Large forest fires. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 1–30.
- MORANDINI F., SANTONI P. A., BALBI J. H. 2001: The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope. *Fire Safety Journal* 36: 519–543.
- MORVAN D., DUPUY J. L. 2001: Modelling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame* 127: 1981–1994.
- NIKLAŠSON M., GRANSTRÖM A. 2000: Numbers and sizes of fires: long-term spatially explicit fire history in a Swedish boreal landscape. *Ecology* 81: 1484–1499.
- NOBLE I. R., BARY G. A. V., GILL A. M. 1980: McArthur's fire-danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology* 5: 201–203.
- Országos Meteorológiai Szolgálat 1993–2002: Napi Időjárásjelentések.
- PALIK B. J., MITCHELL R. J., HIERS J. K. 2002: Modelling silviculture after natural disturbance to sustain biodiversity in the Longleaf pine (*Pinus palustris*) ecosystem: balancing complexity and implementation. *Forest Ecology and Management* 155: 347–356.
- PASTOR E., ZÁRATE L., PLANAS, E., ARNALDOS J. 2003: Mathematical models and calculation system for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science* 29: 139–153.
- SANTONI P. A., BALBI J. H. 1998: Modelling of two-dimensional flame spread across a sloping fuel bed. *Fire Safety Journal* 31: 201–225.
- SIMEONI A., SANTONI P. A., LARINI M., BALBI J. H. 2001: On the wind advection influence on the fire spread across a fuel bed: modelling by a semi-physical approach and testing with experiments. *Fire Safety Journal* 36: 491–513.
- SWETNAM T. W. 1993: Fire history and climate change in giant sequoia groves. *Science* 262: 885–889.
- TAMÁS J. 1997: A növényzet regenerálódása leégett feketefenyvesek helyén, dolomiton. Egyetemi szakdolgozat, ELTE, Budapest.
- TAMÁS J. 2001a: A feketefenyvesek telepítése Magyarországon, különös tekintettel a dolomitkopárokra. *Természetvédelmi Közlemények* 9: 75–85.
- TAMÁS J. 2001b: Tűz utáni szukcesszió vizsgálata feketefenyvesekben. Egyetemi doktori értekezés kézirat, ELTE, Budapest.
- TAMÁS J. 2003: The history of Austrian pine plantations in Hungary. *Acta Botanica Croatica* 62: 147–158.
- TAMÁS J., CSONTOS P. 1995: Comparative coenological studies following forest fires. Abstracts of the 7th European Ecological Congress, EURECO 95, August 20–25, Budapest, p. 244.
- TAMÁS J., CSONTOS P. 1998: A növényzet tűz utáni regenerálódása dolomitra telepített feketefenyvesek helyén. In: CSONTOS P. (szerk.): Sziklagyeppek szünbotanikai kutatása. Scientia Kiadó, Budapest, pp. 231–264.
- VIEGAS D. X. 1998: Weather, fuel status and fire occurrence: predicting large fires. In: MORENO J. M. (ed.): Large forest fires. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 31–48.
- VIEGAS D. X., BOVIO G., FERREIRA A. D., NOSENZO A., SOL B. 1999: Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe. *International Journal of Wildland Fire* 9: 235–246.
- VIEGAS D. X., NETO L. P. C. 1991: Wall shear-stress as a parameter to correlate the rate of spread of a wind induced forest fire. *International Journal of Wildland Fire* 1: 177–188.
- VIEGAS D. X., VARELA V. G. M., BORGES C. P. 1994: On the evolution of a linear fire front in a slope. *Proc. 2nd Int. Conf. on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal*, pp. 301–318.
- VIEGAS D. X., VIEGAS M. T., FERREIRA A. D. 1990: Characteristics of some forest fuels and their relation to the occurrence of fires. *Proc. 1st Int. Conf. on Forest Fire Research, Paper B.03, Coimbra, Portugal*, 13.
- VIEGAS D. X., VIEGAS M. T., FERREIRA A. D. 1992: Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in Central Portugal. *International Journal of Wildland Fire* 2: 69–86.
- ZACKRISSON O. 1977: Influence of forest fires on the North Swedish boreal forest. *Oikos* 29: 22–32.
- ZAMBÓ P. 1995: A Pilisi Parkerdő Rt. területén 1993–1994-ben bekövetkezett erdőtűzeokről, a kár mértékéről és annak felszámolására tett erőfeszítésekről. *Erdészeti Lapok* 130: 152.

ANALYSIS OF FIRE-RISK CONDITIONS IN *PINUS NIGRA*  
STANDS BY USING McARTHUR'S MODELI. CSERESNYÉS<sup>1</sup>, P. CSONTOS<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Plant Taxonomy and Ecology, Loránd Eötvös University  
Pázmány P. stny. 1/C, Budapest, H-1117, Hungary; e-mail: cseresnyes.imre@freemail.hu<sup>2</sup>MTA-ELTE Research Group for Theoretical Biology and Ecology  
Pázmány P. stny. 1/C, Budapest, H-1117, Hungary; e-mail: cspeter@ludens.elte.hu

**Keywords:** forest fire, Austrian pine, flame height, drought factor, rate of spread, fire danger index, spotting distance

Austrian pine (*Pinus nigra* Arn.), an alien conifer in Hungary, forms highly flammable vegetation type due to the accumulation of needle litter. The flammability of these forests was indicated by the frequent fire events in Dunazug Mountains during the latest decades.

The fire-risk relations in Dunazug Mountains were examined by using of McArthur's empirical model. If the amount of fuel, temperature, relative humidity, wind speed, degree of slope and drought factor are known, the fire danger index (FDI; which is the probability of combustion), flame height, rate of spread and spotting distance can be calculated. The actual value of drought factor was determined from the amount of last precipitation, the days since last rain and the Byram-Keetch Drought Index (BKDI).

It is known from our previous studies that the fuel reaches a maximum mass in the stand age class 60–80 years, therefore forest fires are expected mainly in this age class. BKDI values were already known from our previous studies for years between 1993 and 2002.

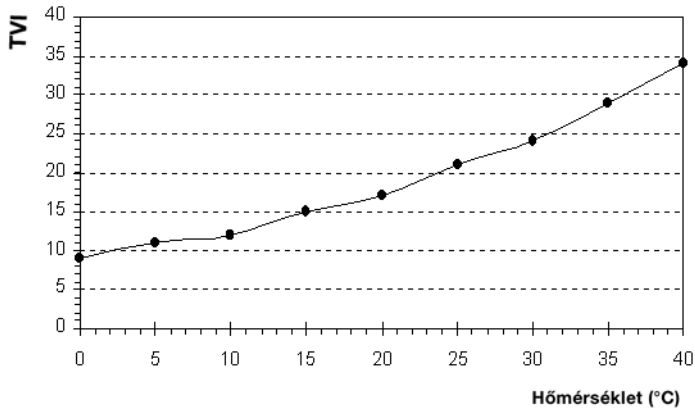
To analyse the daily maximum and the annual trend of drought factor we used the daily BKDI values and daily rainfall had fixed at Budapest-Lőrinc meteorological station from 1993 to 2002. The mean value of drought factor was five from January to May then began to increase in early June, showing its maximum (value 8) in August and September. Later the drought factor decreased continuously till the end of November, when it stabilized at value five. During the most droughty year (2000) the drought factor reached the highest possible value (10) in six decades.

It was also examined how the changing meteorological factors affect the fire-risk relations. One factor among six (amount of fuel, temperature, relative humidity, wind speed, degree of slope and drought factor) was changed within an appointed interval (while the other five parameters were kept constant) and its result on the four outgrowths of the model (FDI, flame height, rate of spread, spotting distance) was examined. We used the following fixed parameters: 30 °C temperature, 30% relative humidity, 30 km/h wind speed, 30 degree of slope and Drought Factor value 10. The fuel load (diameter less than 6 mm) has already known from our former research.

Our results show that the increase of temperature, wind speed and drought factor rise the FDI, flame height, rate of spread and spotting distance, while the increase of relative humidity has the opposite effect. The amount of fuel doesn't influence the FDI, but its increase promotes the spread of fire and rises the flame height. The rate of spread is always much higher uphill than on flat ground or downhill. On an average summer day (when the mentioned fixed parameters prevail) the fire-risk is very high (FDI=24), the flame height is 9.19 m in the stand age class 60–80 years, the rate of spread is 4.19 km/h uphill and the spotting distance is 1.53 km. If the weather conditions become extreme (37 °C, 16% relative humidity, 55 km/h wind speed), the fire-risk rises also to extreme (FDI=90) similar to the Mediterranean regions.

The reliability of McArthur's model was tested by analysing of experimental laboratory results originating from scientific literature. Our own results proved to be compatible with these data.



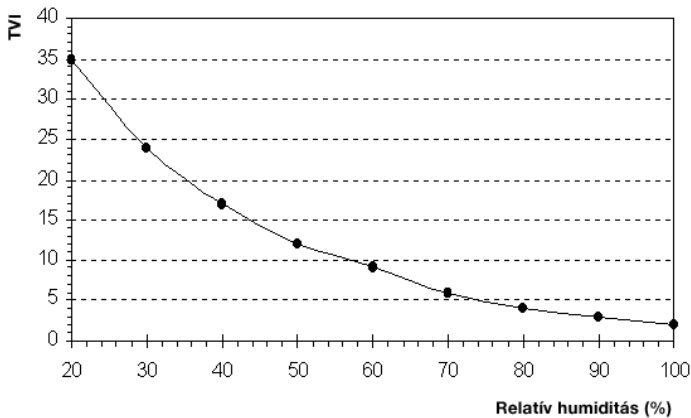
Mellékelt  
Appendix

3. ábra A TVI (tűzveszélyességi index) változása a hőmérséklettel, bármely állománykor esetén (mivel a TVI független az éghető anyag mennyiségétől). Relatív humiditás= 30%, szélsebesség= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

Figure 3. Changes of the FDI (fire danger index) with the temperature in *Pinus nigra* stands.

(Since the FDI is independent of the amount of fuel, age classes are not distinguished.)

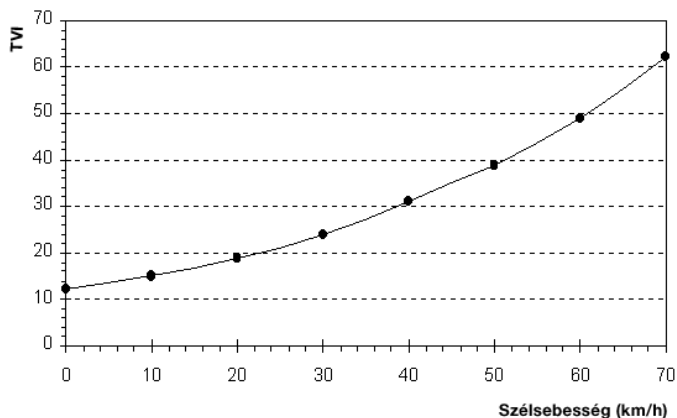
Constant parameters: relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°.



4. ábra A TVI (tűzveszélyességi index) változása a relatív páratartalommal, bármely állománykor esetén (mivel a TVI független az éghető anyag mennyiségétől). Hőmérséklet= 30 °C, szélsebesség= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

Figure 4. Changes of the FDI (fire danger index) with the relative air humidity in *Pinus nigra* stands. (Since the FDI is independent of the amount of fuel, age classes are not distinguished.) Constant parameters: temperature= 30 °C, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°.

Mellékelt folytatása  
Contd. Appendix

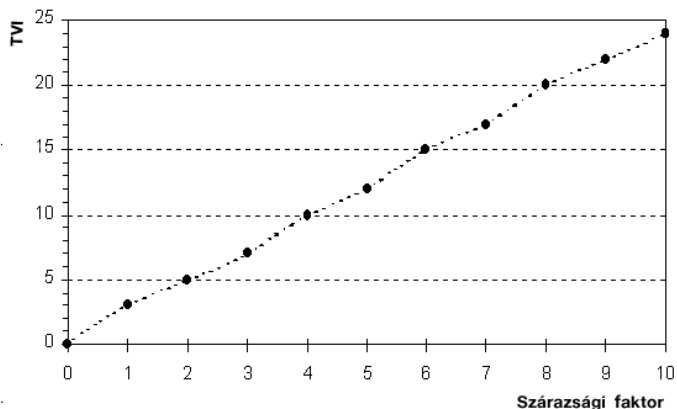


5. ábra A TVI (tűzveszélyességi index) változása a szélsebességgel, bármely állománykor esetén (mivel a TVI független az éghető anyag mennyiségétől). Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

Figure 5. Changes of the FDI (fire danger index) with the wind speed in *Pinus nigra* stands.

(Since the FDI is independent of the amount of fuel, age classes are not distinguished.)

Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, drought factor value= 10, slope angle= 30°.



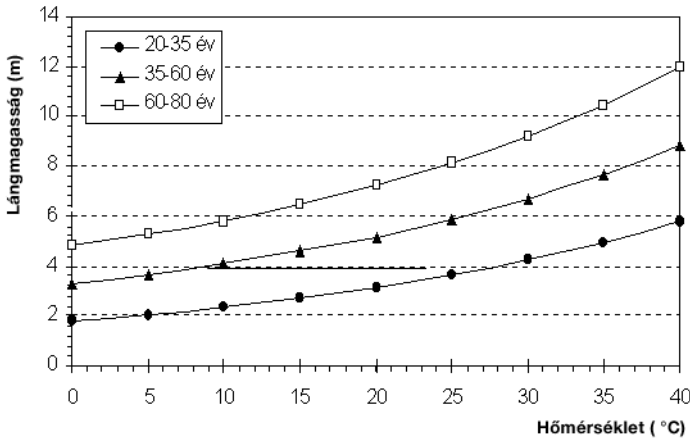
6. ábra A TVI (tűzveszélyességi index) változása a szárazsági faktoral, bármely állománykor esetén (mivel a TVI független az éghető anyag mennyiségétől). Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szélsebesség= 30 km/h, lejtőszög= 30°.

Figure 6. Changes of the FDI (fire danger index) with the drought factor in *Pinus nigra* stands.

(Since the FDI is independent of the amount of fuel, age classes are not distinguished.)

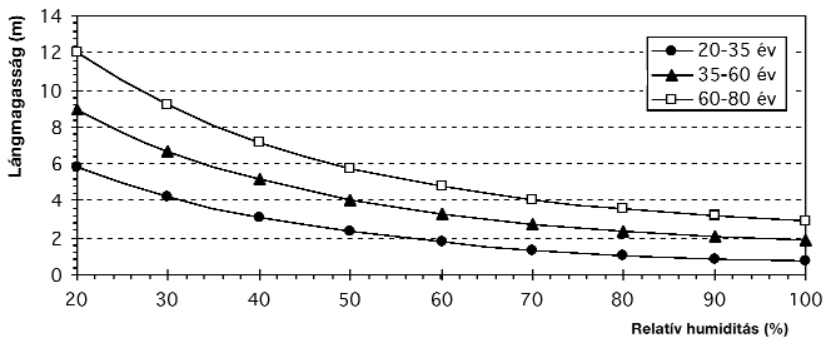
Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, slope angle= 30°.

Mellékelt folytatása  
Contd. Appendix



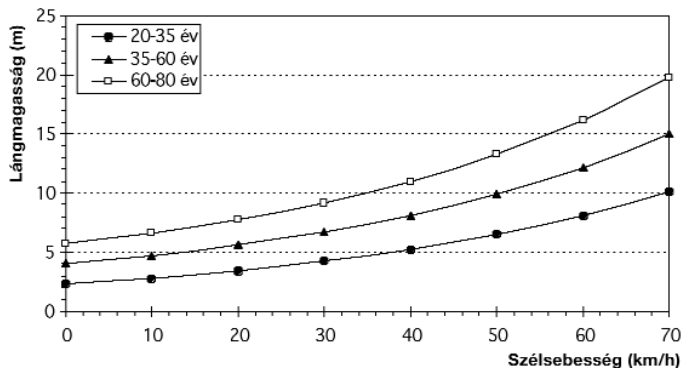
7. ábra A lángmagasság változása a hőmérséklettel, három korcsoport esetén. Relatív humiditás= 30%, szélesebbég= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°, éghető anyag mennyisége a korcsoportokban: 20-35 év= 10574 kg/ha; 35-60 év= 14024 kg/ha; 60-80 év= 18564 kg/ha.

Figure 7. Changes of the flame height with the temperature in the three stand age classes.  
Constant parameters: relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°, amount of fuel regarding stand age: 20-35 years= 10574 kg/ha; 35-60 years= 14024 kg/ha; 60-80 years= 18564 kg/ha.



8. ábra A lángmagasság változása a relatív páratartalommal, három korcsoport esetén. Hőmérséklet= 30 °C, szélesebbég= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°. A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.  
Figure 8. Changes of the flame height with the relative air humidity in the three stand age classes.  
Constant parameters: temperature= 30 °C, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.

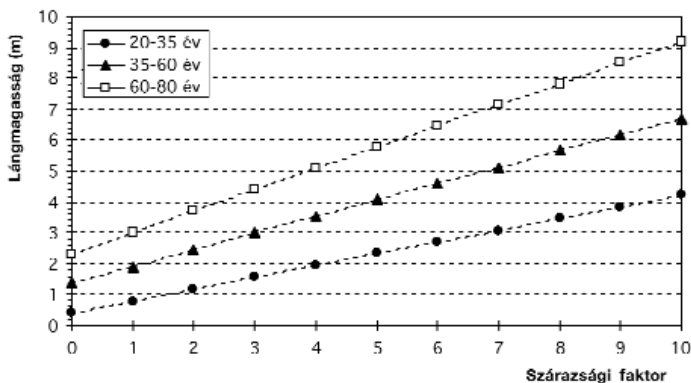
Mellékelt folytatása  
Contd. Appendix



9. ábra A lángmagasság változása a szélsebességgel, három korcsoport esetén. Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°. A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 9. Changes of the flame height with the wind speed in the three stand age classes.

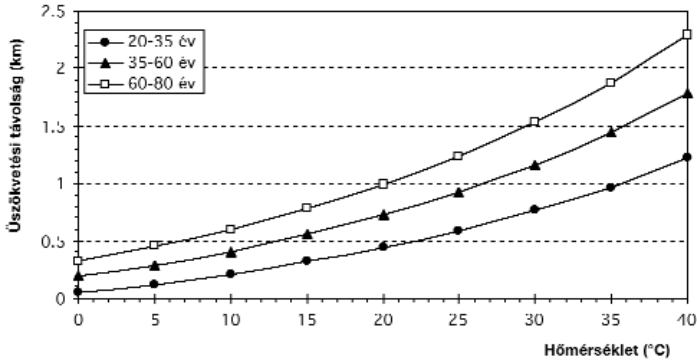
Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, drought factor value= 10, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.



10. ábra A lángmagasság változása a szárazsági faktoral, három korcsoport esetén. Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szélsebesség= 30 km/h, lejtőszög= 30°. A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 10. Changes of the flame height with the drought factor in the three stand age classes. Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, slope angle= 30°.

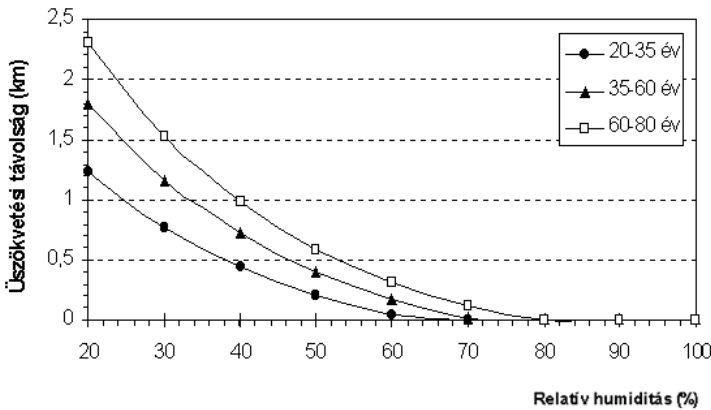
See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.

Mellékelt folytatása  
Contd. Appendix

11. ábra Az üszökvetési távolság változása a hőmérséklettel, három korcsoport esetén. Relatív humiditás= 30%, szélesség= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 11. Changes of the spotting distance with the temperature in the three stand age classes. Constant parameters: relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.

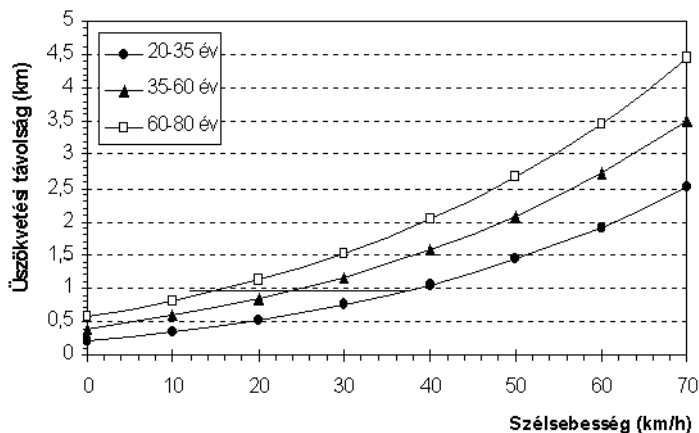


12. ábra Az üszökvetési távolság változása a relatív humiditással, három korcsoport esetén. Hőmérséklet= 30 °C, szélesség= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 12. Changes of the spotting distance with the relative air humidity in the three stand age classes. Constant parameters: temperature= 30 °C, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.

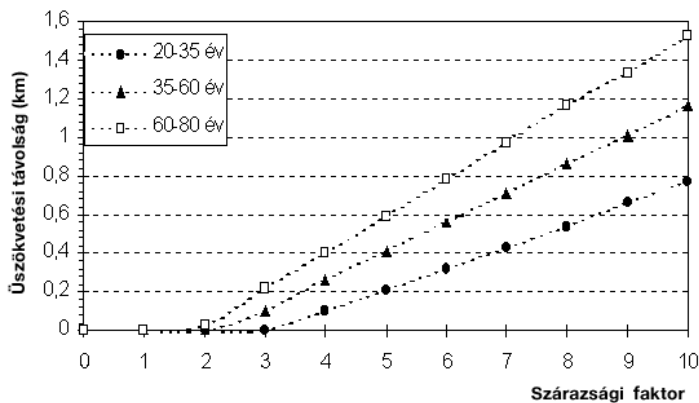
Mellékelt folytatása  
Contd. Appendix



13. ábra Az üszökvetési távolság változása a szélsebességgel, három korcsoport esetén. Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°. A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 13. Changes of the spotting distance with the wind speed in the three stand age classes. Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, drought factor value= 10, slope angle= 30°.

See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.



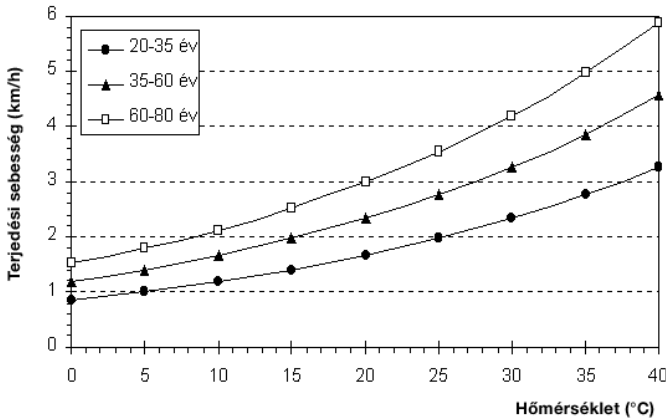
14. ábra Az üszökvetési távolság változása a szárazsági faktoral, három korcsoport esetén. Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szélsebesség= 30 km/h, lejtőszög= 30°.

A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 14. Changes of the spotting distance with the drought factor in the three stand age classes.

Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.

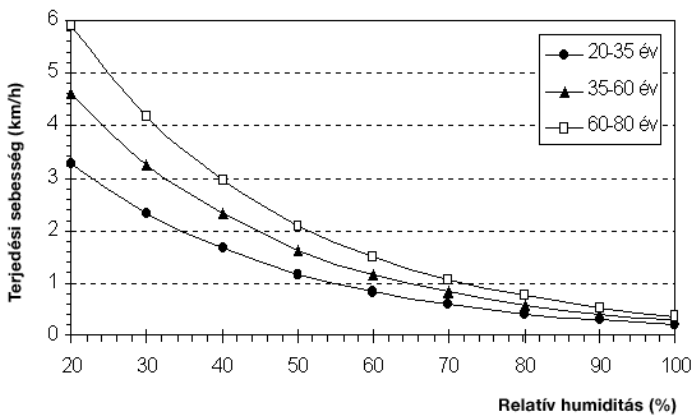


Mellékelt folytatása  
Contd. Appendix

15. ábra A tűz terjedési sebességének változása a hőmérséklettel, három korcsoport esetén. Relatív humiditás= 30%, szélsebesség= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 15. Changes of the spreading rate of fire with the temperature in the three stand age classes. Constant parameters: relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.

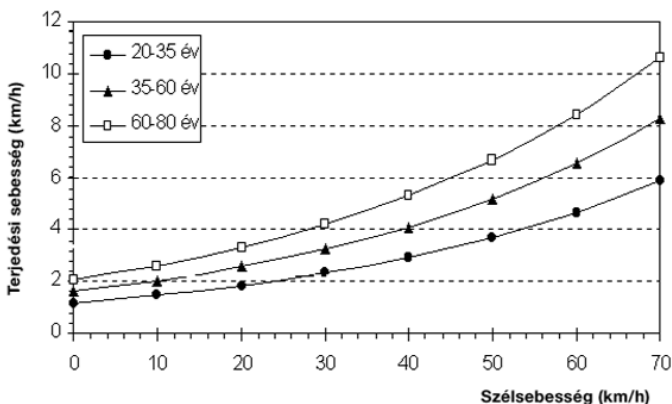


16. ábra A tűz terjedési sebességének változása a relatív humiditással, három korcsoport esetén. Hőmérséklet= 30 °C, szélsebesség= 30 km/h, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 16. Changes of the spreading rate of fire with the relative air humidity in the three stand age classes. Constant parameters: temperature= 30 °C, wind speed= 30 km/h, drought factor value= 10, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.

Mellékelt folytatása  
Contd. Appendix



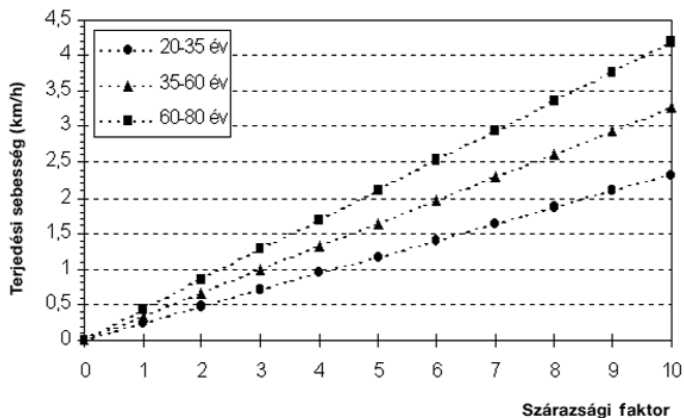
17. ábra A tűz terjedési sebességének változása a szélsebességgel, három korcsoport esetén.

Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szárazsági faktor= 10, lejtőszög= 30°.

A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 17. Changes of the spreading rate of fire with the wind speed in the three stand age classes.

Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, drought factor value= 10, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.



18. ábra A tűz terjedési sebességének változása a szárazsági faktoral, három korcsoport esetén.

Hőmérséklet= 30 °C, relatív humiditás= 30%, szélsebesség= 30 km/h, lejtőszög= 30°.

A figyelembe vett éghető anyag mennyiségek azonosak a 7. ábránál megadottakkal.

Figure 18. Changes of the spreading rate of fire with the drought factor in the three stand age classes.

Constant parameters: temperature= 30 °C, relative air humidity= 30%, wind speed= 30 km/h, slope angle= 30°. See Fig. 7 for the amounts of fuel considered in the three stand age classes.