



Különböző újrahasznosított aszfalt (RAP) tartalmú, habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverékek közvetett húzószilárdságának modellezése

Ali Saleh¹, Gáspár László²

¹Széchenyi István Egyetem, Építőmérnöki Kar, Közlekedésépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

²Széchenyi István Egyetem, Építőmérnöki Kar, Közlekedésépítési és Vízgazdálkodási Tanszék és a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.

E-mail: ali.b.saleh.090@gmail.com, gaspar.laszlo@kti.hu

DOI: [10.36246/UL.2024.1.01](https://doi.org/10.36246/UL.2024.1.01)

KIVONAT

A cikk a különböző arányban újrahasznosított aszfaltot (RAP) tartalmazó aszfaltkeverékek közvetett húzószilárdságának vizsgálatára összpontosít, lineáris regressziós és a neurális hálózati modellek alkalmazásával. A Véletlenszerű erdő (Random Forest) és a Neurális hálózat (Neural Network) modell összehasonlítása szemléltette és igazolta a gépi tanulási technikák aszfaltok közvetett húzószilárdságának (ITS-értékeknek) becslésére való megfelelőségét, nedves és száraz körülmények között egyaránt. Ez a kutatási munka hozzájárult ahhoz, hogy az aszfaltkeverékek teljesítményét befolyásoló sokrétű dinamikát egyre jobban meg lehessen érteni, emellett értékes adalékokat nyújtott a pálya-szerkezet-tervezési és -építési gyakorlat különböző környezeti feltételek mellett való optimalizálásához. A munka során kifejlesztett modell sikeresen, tehát magas R^2 -értékkel képes becsülni az ITS (nedves és száraz) érték és az azt befolyásoló tényezők, a habosított bitumen tartalom (FBC) és a RAP közötti kapcsolatot. A további vizsgálat feltárta az ITS metrika nedves és száraz körülmények között eltérő viselkedését.

Kulcsszavak: habosított bitumen, meleg aszfaltkeverék, neurális hálózat, szupport vektor regresszió (SVR), gépi tanulás

ABSTRACT

The paper concentrates on the modeling of Indirect tensile strength (ITS) of foamed bitumen bound mix asphalt with variable reclaimed asphalt pavement (RAP) content using linear regression analysis and support vector regression (SVR) models. A comparison performed between Random Forest and Neural Network models illustrates and proves the versatility of machine learning techniques in predicting asphalt ITS values both in wet and dry conditions. The research work enhances our understanding of the multifaceted dynamics influencing the performance of asphalt mixtures, offering valuable insights for optimizing pavement design and construction practices in diverse environmental conditions. The model developed successfully captures the relationship between the ITS (wet and dry) metric and its contributing factors, Foamed Bitumen Content (FBC) and RAP, with a high R-squared value. Further examination reveals distinct behaviour of the ITS metric in wet and dry conditions.

Keywords: foamed bitumen, warm mix asphalt, Neural Network, Support Vector Regression (SVR), Machine learning

Ali Saleh

Okl. építőmérnök, diplomáját 2015-ben szerezte a Thisreen Egyetemen (Szíria) 2015-ben, habosított bitumen témában; Latakia kikötőben különböző mérnöki feladatokat hajtott végre; 2020 szeptembere óta a Széchenyi István Egyetemen, Győrben, Stipendium Hungaricum ösztöndíjas, PhD-hallgató, 8 publikáció szerzője.

Gáspár László

Okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, 1971 óta a KTI Nonprofit Kft. alkalmazottja, jelenleg kutató professzor, 1999 óta a Széchenyi István Egyetemen, Győr dolgozik, most professzor emeritus, 473 publikáció szerzője, amelyekre 895 független hivatkozás ismert, 635 szakmai előadást tartott.

1. BEVEZETÉS

Az amerikai burkolt úthálózat 96 százaléka aszfaltburkolatú, bizonyítva az anyag döntő jelentőségét az útéépítésben [1]. Az útpályaszerkezet egészének hosszú távú teljesítménye az egyes rétegek kölcsönhatásától is nagy mértékben függ; ebben a tekintetben a tudományos alapokon nyugvó pályaszerkezet-tervezési módszerek alkalmazása kiemelt szerephez jut. Ebben a vonatkozásban feltétlenül említést érdemel a Superpave módszer, a Bailey-módszer, a Durva adalékanyag hézagát kitöltő módszer (Coarse Aggregate Void Filling, CVAF), a Marshall-módszer és a Kiegyensúlyozott keverési módszer; ezek mindegyike érdemlegesen hozzá tud járulni a jó minőségű aszfaltkeverékek előállításához [2], [3].

A meleg aszfaltkeverék (WMA) és az azzal kapcsolatos előnyök iránt az elmúlt években egyre nagyobb érdeklődés nyilvánul meg, az útügyi projektek költségeinek, és az üzemanyag-fogyasztásnak a csökkenése, illetve az energiahatékonyság növekedése következtében. A WMA további környezetvédelmi előnyei, különösen a károsanyag kibocsátásának csökkentése terén, kedvezően járulnak hozzá mind a környezet megóvásához, mind pedig az úton dolgozók jólétéhez. Újabb technológiák jelentek meg az alacsonyabb keverékgyártási hőmérsékletre irányuló igények kielégítésére, ezek közül a habosított bitumen a fenntartható útéépítés egyik fontos eleme [4].

A habosított bitumen technológiát elterjedten alkalmazzák alaprétegek stabilizálására. Ennek előnyei közé tartozik az alapréteg szilárdságának növelése, amelynek következtében a rétegvastagság csökkenthető, a vízzárósága fokozódik, valamint a szélsőségesen kedvezőtlen időjárási viszonyokkal szemben is nagyobb lesz az ellenállása. A habosított bitumen készítésének elvét 1956-ban Ladis Csanyi professzor dolgozta ki az Iowa Állami Egyetemen [5]. A Mobil Oil későbbi fejlesztései, köztük a tágulási kamra bevezetése, a technológiát tovább finomították.

A habosított bitumen mechanikája a víznek, a levegőnek és a bitumennek a tágulási kamrában való alapos összekeverését jelenti. Ezen összehangolt eljárás szerint, a forró bitumenbe kis mennyiségű, hideg vizet fecskendeznek, aminek hatására az eredeti térfogatának körülbelül tizenötszörösére tágul [6]. A habosított bitumen jellemzőit, mint a legnagyobb térfogatnövekedési arányt (ER) és a felezési időt (HL) olyan tényezők is befolyásolják, mint a bitumen hőmérséklete, a %-os víztartalom, a légnyomás és a bitumen minősége. Figyelemre méltó, hogy a megnövekedett víztartalom hatására nagyobb lesz a térfogatnövekedési arány, ugyanakkor csökken a felezési idő, kényes egyensúlyt teremtve a fenntartható útéépítés ezen területének megtervezésekor.

A környezeti fenntarthatósággal kapcsolatos aggályok kezelése során, egyre nagyobb szerephez jut az újrahasznosított aszfaltanyagok (RAM) felhasználásának optimalizálása. A RAM-nak új aszfaltkeverékekbe történő adagolása nemcsak az anyagköltségek csökkentését szolgálja, hanem a nem megújuló erőforrások megőrzéséhez is érdemlegesen hozzájárul. A National Asphalt Pavement Association (NAPA) által 2018-ban lefolytatott vizsgálat rávilágított arra, hogy az aszfaltkeverékek átlagos RAP %-os aránya az Egyesült Államokban folyamatosan növekedett – a 2009-es 15,6%-ról 2018-ra 21,1%-ra. Az egyes tagállamok Állami Aszfaltéépítési Szövetségei – 77%-os arányban – hangot

adtak azon célkitűzésüknek, hogy az újrahasznosított anyagok hasznosítására irányuló erőfeszítéseiket továbbiakban is fokozni kívánják [7].

Tanulmányok foglalkoztak a különböző visszanyert aszfalt (RAP) tartalommal rendelkező és habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverék teljesítményével [8], [9]. A mikrostruktúrákat, különösen pedig a keverék kötőanyaggal való bevonódottságának hatékonyságát pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgálták [10], [11]. Az újrahasznosított aszfaltkeverékekben a levegő hégageloszlásának vizsgálatár SEM és a röntgen-számítógépes tomográfia alkalmazásával végezték [12], [13].

A laboratóriumi vizsgálatok hatékonyságának növelése érdekében, a kutatók olyan modellezési technikákat alkalmaztak a különböző aszfaltkeverékek optimális bitumentartalmának meghatározása, mint a mesterséges neurális hálózatok [14]. Nevezetesen, a válasz felületi (Response Surface) módszertan alkalmazásával, az újrahasznosított meleg adalékanyag-keverékeknel, a legkedvezőbb bitumentartalmat határozták meg.

2. HÁTTÉRINFORMÁCIÓK

2.1. A KÖTŐANYAG HATÁSA

Átfogó vizsgálat sorozatot végzett Abreu et al. [15], hogy részletes információkhoz jusson a bitumen minőségének a habosítási folyamatra gyakorolt hatása tekintetében, különösen, ha a habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverékekben (FBM) azt különböző újrahasznosított aszfalt (RAP) tartalommal is kombinálják. Eredményeik azt mutatták, hogy a RAP-tartalom növekedésével lágyabb bitumentípus alkalmazása válik szükségessé, ami a habosítási folyamatot érdemlegesen javítja.

Arefin et al. [16] a habosított bitumennel készült aszfaltkeverékek (FBM) rövid és hosszú távú öregedési hatásait vette vizsgálat alá. Kutatásaik aláhúzták a kötőanyagminőség kulcsfontosságú szerepét a keverék öregedési folyamatának befolyásolásában. Ezzel hangsúlyozzák annak a jelentőségét, hogy a kötőanyag minél több tulajdonságát a habosított aszfaltkeverékek tartósságának és teljesítményének értékelése során vegyék figyelembe.

Egy újabb vizsgálatban Kar et al. [17] annak megértésére összpontosított, hogy a bitumen aszfaltén- és aromástartalma hogyan befolyásolja a habosítási jellemzőket. Ezeknek az alkotóelemeknek alapos vizsgálatával, a tanulmány értékes információkkal szolgál a bitumen összetétele és a habosítási folyamat közötti bonyolult tekintetében, érdemlegesen hozzájárulva a habosított aszfalttechnológiák fejlesztéséhez.

Bairgi et al. [18] és Hasan et al. [19] tanulmányai megkérdőjelezték azokat a hagyományos állításokat, hogy a habosított kötőanyag rugalmassági modulussal mért rugalmas viselkedése közvetlen összefüggésben van a habosított víz mennyiségével. Ez a hagyományos elvárásoktól való eltérés azt sugallja, hogy a habosítási folyamatot befolyásoló tényezők összetett kölcsönhatása bonyolultabb a rugalmassági modulus és a habosított víztartalom közötti közvetlen összefüggésnél.

2.2. A RAP-TARTALOM HATÁSA

Az újrahasznosított aszfalt (RAP) tartalomnak a habosított bitumen kötőanyagú keverék (FBM) teljesítményére gyakorolt hatását számos vizsgálat tárgyalta. Taziani et al. [20] a 100% RAP-ot és töltőanyagként portlandcementet tartalmazó FBM-mel foglalkozott. Vizsgálatuk során a dinamikus kúszást és a dinamikus modulust határozták meg, összehasonlítva a rostok keverékhez való hozzáadásának hatásával. Az FBM teljesítményében tapasztalt jelentős pozitív változást a rostok és a cement felhasználásának tulajdonították.

Chomicz-Kowalska és Ramiączek [21] a habosított bitumen és a bitumenemulzió kötőanyagú aszfaltkeverékeket hasonlították össze. Számos laboratóriumi tömörítési módszert és %-os RAP-arányt vettek figyelembe. Az eredmények rávilágítottak arra, hogy ezek a tényezők milyen hatással vannak a vizsgált keverékek tulajdonságaira, hangsúlyozva a RAP-tartalom érdemleges teljesítménybefolyásoló szerepét.

Hou et al. [22] a RAP szemeloszlásának az FBM dinamikus modulusára gyakorolt hatását tanulmányozta alacsony hőmérsékleten (0°C alatt). Kutatásaik azt mutatták, hogy a durvább szemeloszlás alacsony hőmérsékleten az FBM dinamikus modulusát csökkenti. Ez a hatás azonban magasabb hő-mérsékleten nem volt érdemleges.

Guatimosim et al. [23] átfogó vizsgálata a hidegen újrahasznosított, habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverékek laboratóriumi és helyszíni értékelésére irányult. Eredményeik szerint, a hagyományos keverékekhez képest, viszonylag korán romlás jeleit tapasztalták. Idővel a pályaszerkezet-behajlás csökkent, a réteg merevségének növekedésével, bizonyítva az FBM teljesítményének időben változó jellegét.

2.3. A KEVERÉSI HŐMÉRSÉKLET HATÁSA

A habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverékeket környezeti hőmérsékleten terítik el, és tömörítik, (ezért gyakran hidegkeveréknek is nevezik azokat), az aszfalt keverési hőmérséklete döntő szerephez jut. Számos tanulmány hangsúlyozta az ásványi anyagok melegítésének jelentőségét a zúzalékszemek hatékonyabb bevonása és a kedvezőbb mérnöki jellemzők szempontjából [8]. A kutatások eredményei azt mutatják, hogy a habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverékek optimális keverési hőmérséklete, az adalékanyag típusától függően, a 13°C és a 23°C közötti tartományba esik. Az ezen tartományt el nem érő hőmérsékletű adalékanyagok gyengébb minőségű, habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeveréket eredményeznek [5].

Sánchez et al. [24] 60% RAP-tartalmú FBM minták készítésekor az adalékanyagok hőmérsékletét 160°C-ig emelték. Eredményeik azt mutatták, hogy az ásványi anyag hőmérsékletének 90°C fölé növelése a RAP előregedését eredményezte, ami aztán csökkenti a fáradással szembeni ellenállást is. Ez a tény pedig aláhúzza a keverési hőmérséklet gondos ellenőrzésének fontosságát a habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverék optimális teljesítményének és hosszú élettartamának biztosítása érdekében.

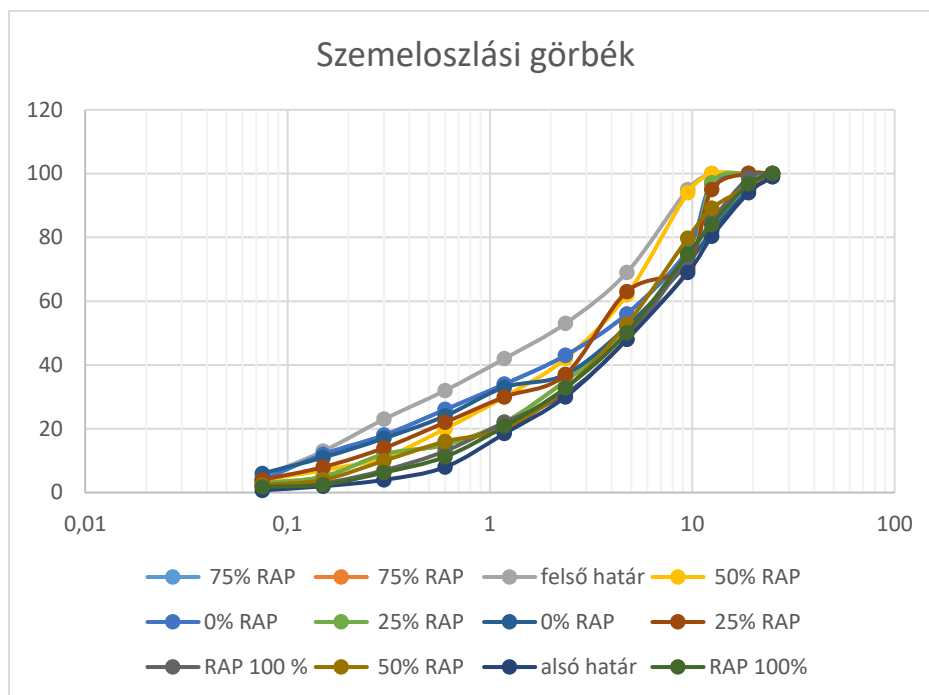
2.4. A HABOSÍTOTT BITUMENTARTALOM HATÁSA

A habosított bitumen kötőanyagok kisebb ellenállást mutatnak a nyírási deformációval szemben, mint a nem habosított változatok. A habosított bitumen tartalmú aszfalt ugyanakkor növeli a fáradási teljesítményt, miközben az aszfalt merevségét csökkenti. Ez a javulás a habosított bitumen kötőanyagú meleg aszfaltkeverékekben a keveréshez és a tömörítéshez szükséges alacsonyabb hőmérsékletnek tulajdonítható, aminek következtében az öregítő hatások csökkennek. Az újrahasznosított aszfaltburkolat anyagában (RAP) levő öregedett kötőanyag kulcsfontosságú szerepet játszik a lágyabb, meleg keverék kötőanyagának ellensúlyozásában, ezáltal hozzájárulva a RAP-ot és habosított bitument tartalmazó aszfaltkeverék öregedésének mérsékléséhez. Következésképpen ez a bonyolult kölcsönhatás rámutat a habosított bitumen kötőanyagú aszfaltkeverék alkalmazásának kedvező hatására a fáradással szembeni ellenállós optimalizálása terén, különösen olyan esetekben, amikor újrahasznosított anyagokat, így, például, RAP-t is használnak [25].

3. AZ ALKALMAZOTT MÓDSZERTAN

3.1. AZ ADALÉKANYAG SZEMELOSZLÁSÁNAK ÉS AZ OPTIMÁLIS NEDVESSÉGTARTALOMNAK A MEGHATÁROZÁSA

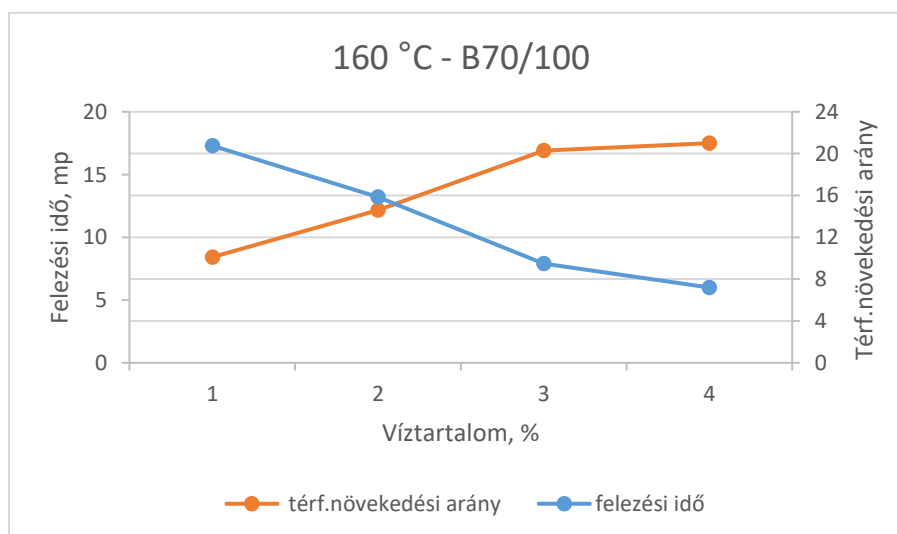
Az ismertetendő vizsgálatok során 2-2 szemeloszlású változatot készítettek 0-25-50-75-100 %-nyi újrahasznosításra szánt, tört aszfaltburkolat anyagával; mindegyik szemeloszlás kielégítette a megfelelő DIN szabvány követelményeit [26] (1. ábra). Ezen keverékek maximális térfogatsúlya, rendre, a következőknek adódott: 2,474, 2,468, 2,476, 2,471 és 2,464.



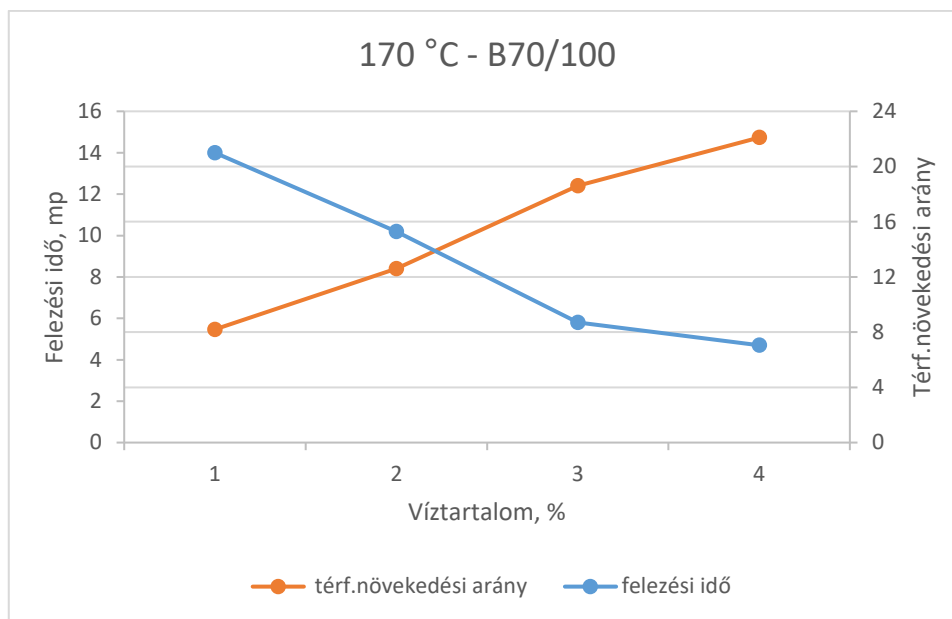
1. ábra: A választott szemeloszlási görbék.

3.2. OPTIMÁLIS NEDVESSÉGTARTALOM MEGHATÁROZÁSA

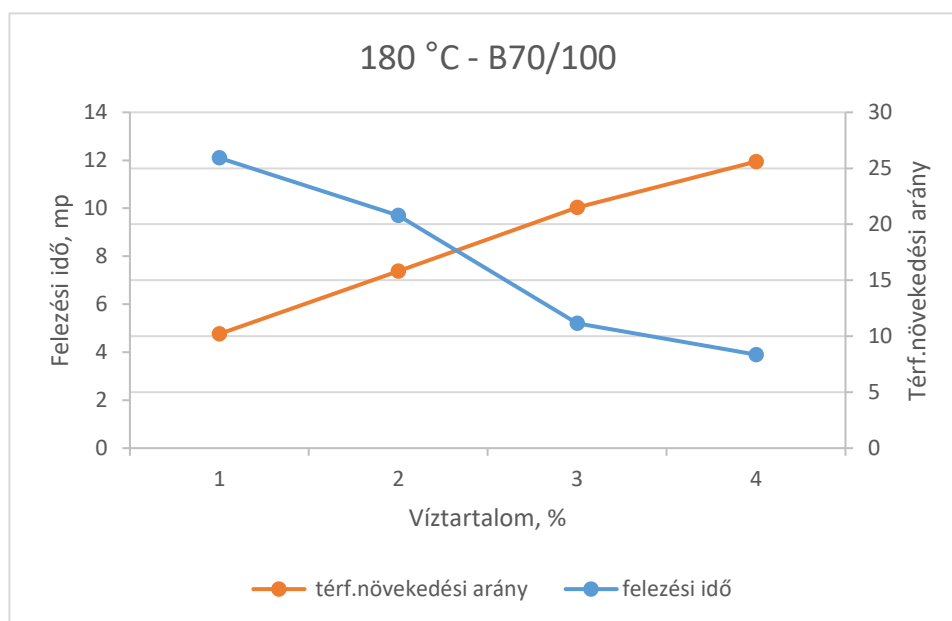
A vizsgálathoz választott 70/100 bitumentípusról megállapítottuk, hogy a megfelelő szabvány [27] előírásait kielégíti, valamint alkalmas az útépitésben adalékanyagok hatékony stabilizálására. A vizsgálathoz felhasznált habosított bitumen optimális tulajdonságai közül kiemelhető a 10,2 mp-es felezési idő és a 12,6-szeres térfogatnövekedési aránya. Ezeket a kívánt tulajdonságokat 2%-os víztartalommal éri el, 170°C-os bitumen hőmérsékleten. Nevezetesen, ezek a habosított bitumen jellemzők megfelelnek a Wirtgen-csoport által megfogalmazott szabályozás követelményeinek [6], amelyek - a hatékony adalékanyag-stabilizáció érdekében 15 °C-ot meghaladó hőmérsékleten - az eredeti térfogat nyolcszorosának megfelelő minimális tágulási arányt és legalább 6 mp-es felezési időt követelnek meg.



2. ábra: A B70/100-as bitumen felezési ideje és térfogatváltozási aránya 160°C hőmérsékleten.



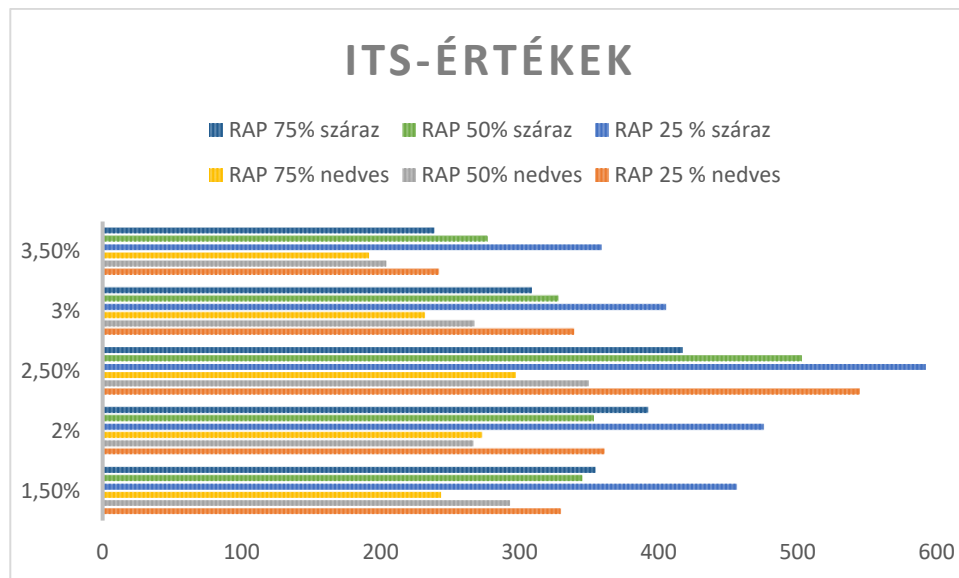
3. ábra: A B70/100-as bitumen felezési ideje és térfogatváltozási aránya 170°C hőmérsékleten.



4. ábra: A B70/100-as bitumen felezési ideje és térfogatváltozási aránya 180°C hőmérsékleten.

3.3. A HABOSÍTOTT BITUMEN OPTIMALIZÁLÁSA

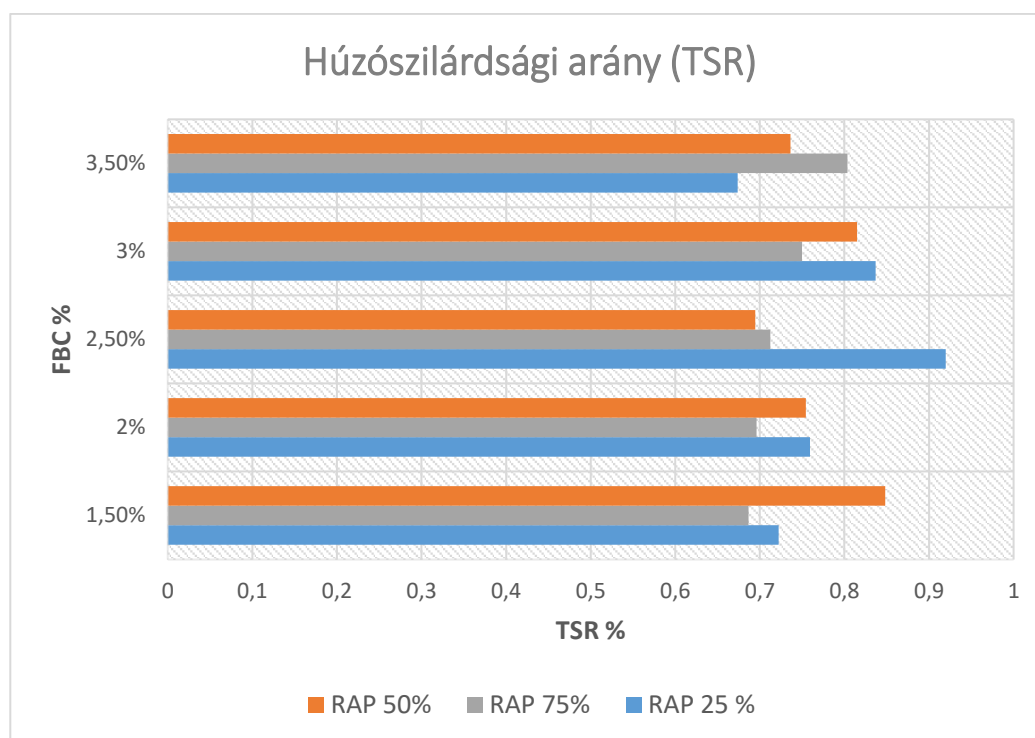
Az 5. ábra szemlélteti mind a habosított bitumen tartalom (FBC), mind pedig a RAP %-os hatását az aszfaltkeverékek szilárdságára, különböző környezeti körülmények között. Az eredmények azt mutatják, hogy ezek a %-os eltérések a közvetett húzószilárdság (ITS) értékében jelentős különbségekhez vezethetnek, rámutatva az FBC és RAP %-os arányok gondos megválasztásának fontosságát az aszfaltkeverékek kívánt teljesítményjellemzőinek eléréséhez, különösen a nedves és a száraz körülmények közötti húzószilárdság tekintetében.



5. ábra: ITS-értékek az FBC %, a RAP % és a környezeti viszonyok függvényében.

A Közvetett húzószilárdság (ITS) vizsgálatában a Húzószilárdság-arány (TSR) az aszfaltkeverékek termikus repedésállóságának értékeléséhez kritikus paraméternek tekinthető. Ez a vizsgálati módszer az anyag húzószilárdságát értékeli, különböző hőmérsékleti feltételek mellett. A TSR a húzószilárdság alacsony és magas hőmérsékleten való arányba állításával történik. A magas TSR azt mutatja, hogy a minta repedéssel szembeni ellenállása hideg időben nagy, míg az alacsony TSR a termikus repedésekkel szembeni érzékenységet jelzi. Tehát a TSR érdemleges segítséget nyújt a különböző hőmérsékleti viszonyoknak ellenálló aszfaltanyagok tervezésében és kiválasztásában, biztosítva az aszfaltburkolatok tartósságának biztosítására [28].

A 6. ábrán a Húzószilárdsági arány (TSR) értékei láthatók az újrahasznosított aszfaltgranulátum (RAP) és a habosított bitumen tartalom (FBC) %-os értékeinek különböző kombinációira. A vizsgált TSR-értékek általában elérik vagy meghaladják a 70-et, kivéve egy esetet (RAP 25%, FBC 3,5%), ami arra utal, hogy ez a variáció a termikus repedésekkel szemben érzékeny.



6. ábra: Húzószilárdsági arány a RAP% és az FBC% függvényében.

4. GÉPI TANULÁSI MODELLEK

4.1. SZUPPORT VEKTOR REGRESSZIÓ (SVR)

Az SVR algoritmuson belül a lineáris függvény mindkét oldalán meghatározott szélességű tartományt („margót”) hoznak létre. Ezt a tűréshatárként szolgáló szélességet egyedileg határozzák meg. Az ezen a területen kívüli mintákat a teljes veszteség kiszámításához felhasználják. Az SVR lényege a célgörbe megfelelő illesztése a hibák lehető legkisebb mértékére való csökkentése érdekében, és a hipersík „testreszabása” a margó maximalizálása érdekében.

A legújabb kutatások során, az SVR algoritmus sokoldalúságát az aszfaltkeverékek különféle tulajdonságainak előrejelzésére is egyre gyakrabban használják. Így, például, az SVR megbízható eredményeket szolgáltató modellnek bizonyult a dinamikus modulus becslésére [29] [30]. Összehasonlító vizsgálatok kimutatták, hogy a meleg aszfaltkeverékek (HMA) dinamikus modulusának előrejelzésében az SVR regresszió a többváltozós regressziós modelleknél sikeresebbnek bizonyul [30]. Ezenkívül az SVR modellek az aszfaltkeverékek nyomvályú-mélységét és közvetett húzószilárdságát is sikeresen előre becsülték [31] [32]. Lényeges megemlíteni, hogy SVR-modelleket útpályák állapotának előre jelzésére is fejlesztettek ki, ígéretes eredménnyel [24] [33]. Mindezek bizonyítják az SVR sokoldalúságát és hatékonyságát az aszfaltkutatás és az útpályaszerkezetek teljesítményének előre becslése terén.

4.2. ADAM OPTIMALIZÁLÓ

Az Adam optimalizáló olyan népszerű optimalizáló algoritmus, amelyet neurális hálózatok tanítására alkalmaznak. Az „Adaptive Moment Estimation” rövidítése, és két optimalizálási algoritmusok technikáit kombinálja. Az Adam optimalizáló ritka gradiensek, „zajos” adatok és a nem stacionárius célfüggvények kezelésének hatékonyságáról ismert. Az Adam minden paraméternél tapasztalható, nagy adaptív tanulási sebessége és lendületes viselkedése a mély neurális hálózatok tanítására különösen alkalmassá teszi [35].

4.3. VÉLETLENSZERŰ ERDŐ (RANDOM FOREST, RF)

Az együttes (ensemble) megközelítések több tanulási algoritmus szinergiáját hasznosítják, hogy az egyes algoritmusok képességein túlmenően javítsák az előrejelzési teljesítményt [36]. A bagging (Bootstrap Aggregating) olyan gépi tanulási technika, amelyet a modellek stabilitásának és pontosságának növelésére használnak; a bagging aggregáció fejlett iterációja a Véletlenszerű Erdő (Random forest, RF), amelynek során számos döntési fából származó előrejelzéseket aggregálnak [37].

A Random Forest egyedülálló előnye a bagging módszerhez képest, hogy minden döntési fa összeállításakor a felosztáshoz szelektíven ki tudja választani a funkciók egy-egy részhalmazát. Ez a funkció jelentősen csökkenti a modell varianciáját, indokolatlan előrejelzési torzítás nélkül. A Random Forest algoritmusban a végső kimenetet többségi szavazási mechanizmus határozza meg, különösen regressziós vizsgálatok esetében.

A Random Forest olyan kritikus jellemzők előrebecslésére hatékonyak bizonyult, mint az aszfalt dinamikus modulusa [36], a keréknyomvályúk mélysége [38], a Nemzetközi Egyenetlenségi Index (IRI) [36], az útpályán jelentkező aligátorrepedés [37] és a burkolatfelület csúszásellenállása [40]. Rugalmassága és robusztussága révén, a Random Forest értékes eszköz az aszfaltkutatóban, emellett az útburkolat tulajdonságainak és teljesítményének értékelése során a pontos előre becslésekhez és a megalapozott döntésekhez is hozzájárul.

4.4. BITUMENES HABOSÍTÓ MODELL

Három modell készült, az első modell regressziós feladat a gépi tanulásban, neurális hálózat segítségével az ITS értékét jelzi előre, az FBC és az RAP bemeneti jellemzők alapján. A modell tanulási hurkot alkalmaz, amely iteratív módon finomítja a modellt, amíg a modell nem képes arra, hogy sok új értéket szimuláljon és tanulmányozzon, különböző feltételek mellett.

A második modell az előzőre épült, négy oszlopból (FBC, RAP, száraz ITS és nedves ITS) álló adatkészleten lineáris regressziós elemzést hajtott végre.

A harmadik modell a szupertektor regressziót (SVR) hasznosította a közvetett húzószilárdság (ITS) előrejelzésére, nedves és száraz körülmények között.

Ezt követően a korábbi modellek ellenőrzésére Random Forest modellek készültek, külön-külön kifejezve nedves és száraz viszonyokra. A betanítást követően, a modelleket a tesztkészleten értékelik, és kiszámítják az átlagos négyzetes hibát, hogy az előre becslött teljesítményüket számszerűsítsék.

5. EREDMÉNYEK

5.1. AZ ITS BEFOLYÁSOLÓ PARAMÉTEREIVEL VALÓ KAPCSOLATA

5.1.1. A HABOSÍTOTT BITUMEN TARTALOM (FBC) ITS-RE GYAKOROLT HATÁSA

Mechanikai tulajdonságok: a habosított bitumen tartalom az aszfaltkeverék merevségét és rugalmasságát növeli.

Nagyobb teljesítmény: a megfelelően ellenőrzött FBC % az adalékanyagok és a bitumen kötőanyag közötti tapadást javítja. Ez a hatékony tapadás pedig hozzájárulhat a nagyobb közvetett húzószilárdsághoz (ITS), ami jobb repedéssel szembeni ellenállást és az útburkolat teljesítményének javulásához vezet.

5.1.2. AZ ÚJRAHASZNOSÍTOTT ASZFALTBURKOLAT (RAP) ADAGOLÁSÁNAK HATÁSA A MECHANIKAI TULAJDONSÁGOKRA

Fenntarthatóság: A RAP aszfaltkeverékekben való alkalmazása egyértelműen fenntartható gyakorlat, mivel az elsődleges nyersanyagok iránti keresletet csökkenti, és az aszfaltgyártással kapcsolatos környezeti hatásokat mérsékeli.

ITS és tartósság: A RAP gondosan megtervezett használata hozzájárul az aszfaltkeverék tartósságának és a terheléssel szembeni ellenállásának növeléséhez, ezáltal javítva a burkolat hosszú távú teljesítményét.

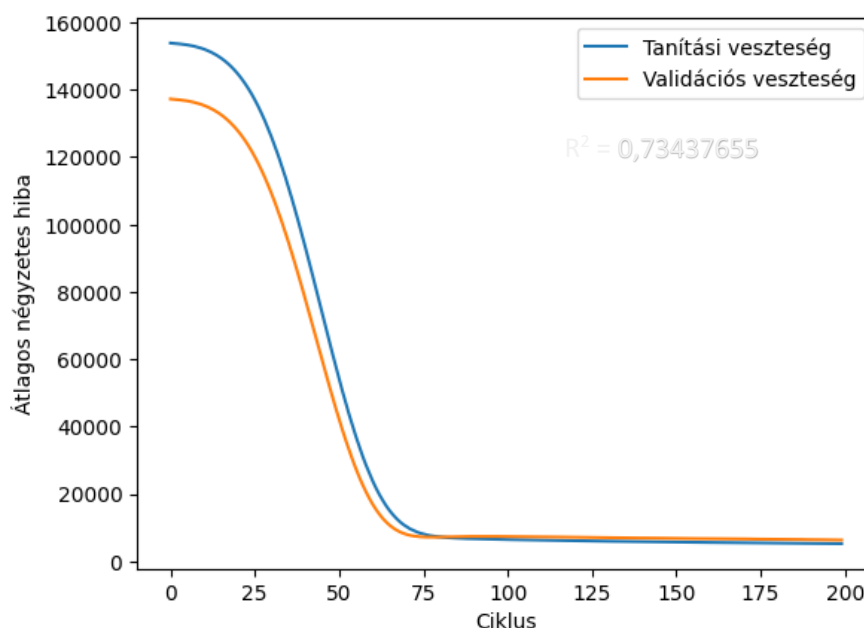
Testreszabás: Az FBC és a RAP egyidejű alkalmazása az aszfaltkeverék-receptúrák test-reszabásához (a megrendelői igények fokozott kielégítéséhez) érdemlegesen hozzájárul, megfelelően a projekt konkrét követelményeinek, figyelembe véve olyan tényezőket, mint az éghajlat, a forgalmi terhelés és az útpálya szerkezete.

5.2. A GÉPI TANULÁSI (ML) MODELL TELJESÍTMÉNYE

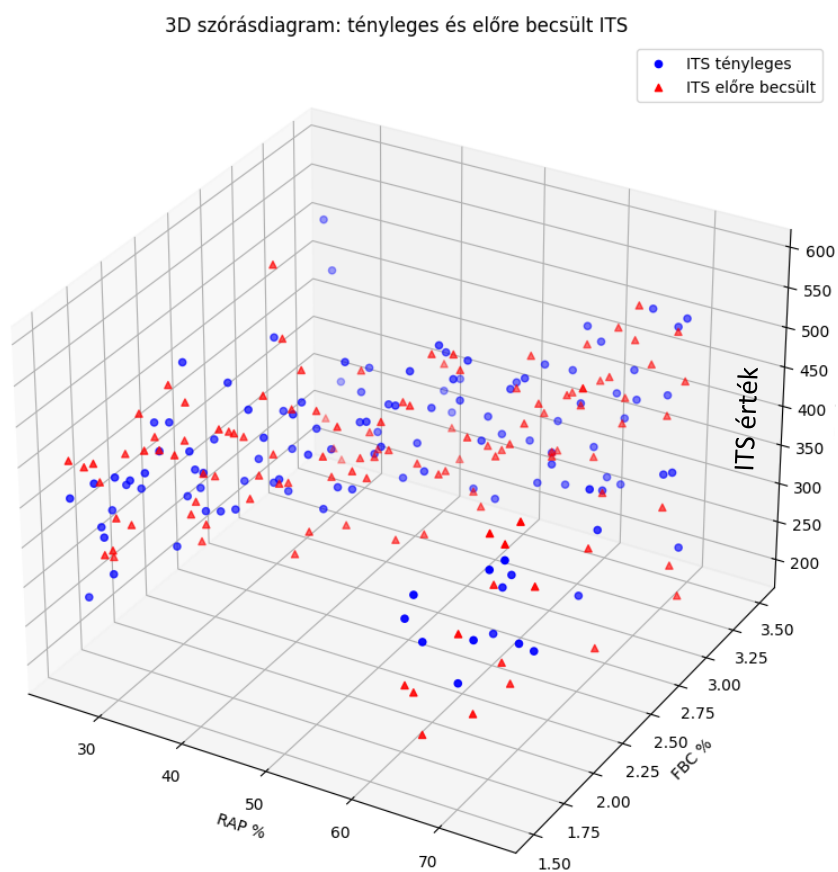
A gépi tanulási regressziós feladat modellje, FBC és RAP bemeneti jellemzőkkel, a közvetett húzószilárdság (ITS) előrejelzésére neurális hálózatot használ. A modell egy betanítási cikluson megy keresztül, amely iteratív módon finomítja magát, hogy új értékek széles skáláját, különböző körülmények között, szimulálni és tanulmányozni tudja. Az adat-előkészítési fázisban, a bemeneti jellemzőket "X" NumPy tömbbe konszolidálják, és az ITS célváltozót y tömbben tárolják. A betanítási hurok (ciklus) magában foglalja az adatok felosztását tanítási és tesztelési készletekre, a szolgáltatások szabványosítását a "StandardScaler" segítségével, és speciális architektúrájú, neurális hálózat felépítését, Keras API alkalmazásprogramozási felület alkalmazásával.

A neurális hálózat részei: bemeneti réteg 2 neuronnal, rejtett réteg 64 neuronnal és "relu" aktiválással, másik rejtett réteg 32 neuronnal és relu aktiválással, és kimeneti réteg 1 neuronnal a regresszióhoz. A modellt Adam optimalizálóval és az átlagos négyzetes hibaveszteség felhasználásával fejlesztették ki. Ezt követően, szabványosított adatokra, 200 ciklusos betanítást hajtanak végre. Ezt követően a tesztadatokra az átlagos négyzetes hibát és az R-négyzetet számítják ki. A betanulási idő-szak jellemzőinek alakulása, beleértve a betanulási veszteség, a validálási veszteség és az R2 diagramjait, a 7. ábrán látható.

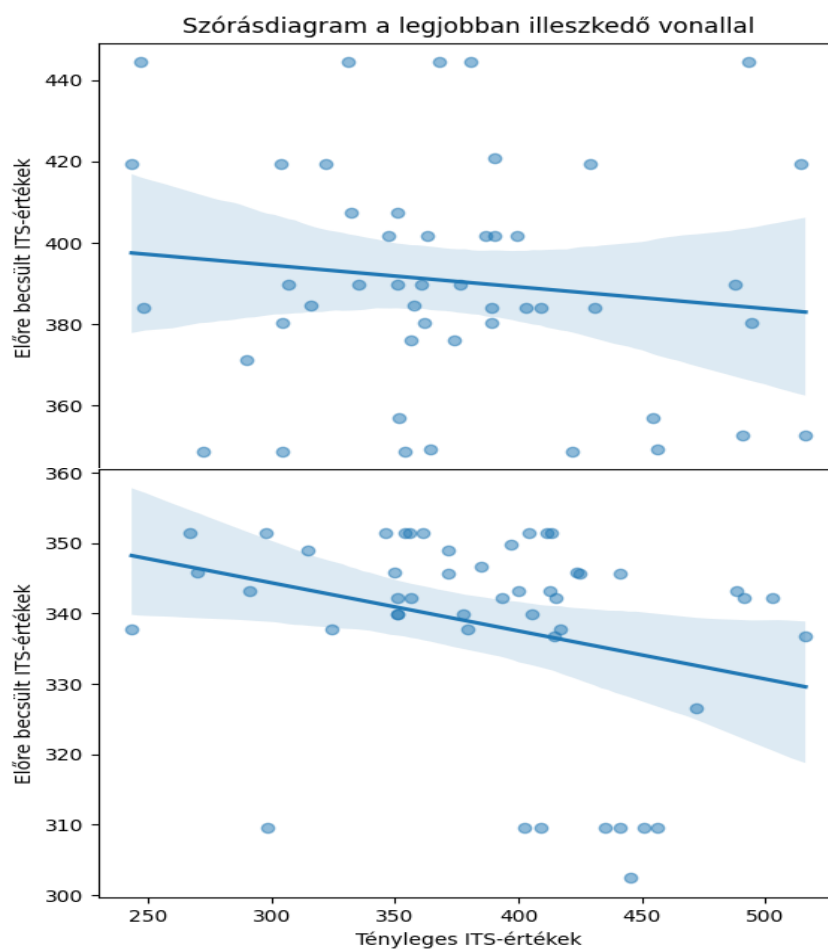
A 8. ábra a betanított modellből származó 3D szórásdiagramokat jeleníti meg, ábrázolva a tényleges (mért) és az előre becsült ITS értékek közötti kapcsolatot. A diagramok egyértelművé teszik, hogy a modell adatai mennyire illeszkednek a mérési eredményekhez. A 9. ábra pedig a betanítási folyamat során rögzített 2D szórásdiagramokat mutatja be, amelyek lehetővé teszik a modell-előrejelzések időbeli alakulásának és korrekcióinak szemléltetését.



7.ábra: A tanítási és a validálási veszteség időbeli alakulása.

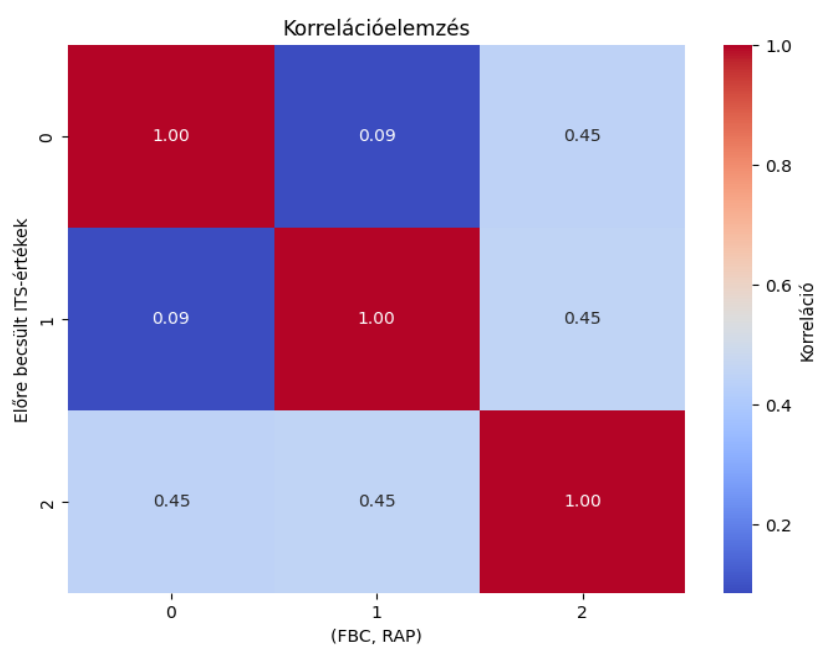


8.ábra: Az ITS 3D-s szórásdiagramja, a RAP (%) és az FBC (%) függvényében.



9. ábra: Két mintának a betanítási időszak alatti, előre becsült és mért ITS-értékek 2D-s szórás-diagramjai, legjobban illeszkedő függvényekkel.

A 10. ábra a korrelációvizsgálat eredményeit összegezi.



10. ábra: Az ITS-értékek és egyes ható tényezők (FBC%, RAP%) közötti korreláció elemzése.

A model végső alakja a következő:

$$ITS = 0,2939FBC + 13,5723RAP + 387,4862 \quad (1)$$

Ez az egyenlet kifejezi a neurális hálózathoz "tanult", az inputok és az előre becsült ITS közötti összefüggést.

A betanítási folyamat az átlagos négyzetes hiba veszteség függvényét és az Adam optimalizálót is hasznosítja. A betanítási folyamat során alkalmazott, legfontosabb egyenletek a következők:

(1) MSE veszteség függvény:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

Az átlagos négyzetes hibát tekintik veszteség függvénynek, ahol n is az adatpontok száma, y_i a tényleges (mért) ITS érték és \hat{y}_i az előre becsült ITS érték.

Adam optimalizáló:

Az Adam optimalizáló pontosítja a modell súlyait, a következő egyenletek alkalmazásával:

a szabályok aktualizálása minden időbeli lépésben (t):

$$t = t + 1 \quad (3)$$

a gradiens kiszámítása t -edik időbeli lépésben:

$$g_t = \nabla_{\theta} * J(\theta_t) \quad (4)$$

az első momentum becslése:

$$m_t = \beta_1 * m_{t-1} + (1 - \beta_1) * g_t \quad (5)$$

a második momentum becslés pontosítása:

$$v_t = \beta_2 * v_{t-1} + (1 - \beta_2) * g_t^2 \quad (6)$$

"zajtól" javított első momentum becslés:

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \quad (7)$$

"zajtól" javított, második momentum becslés:

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (8)$$

paraméterek pontosítása:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \alpha * \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t + \epsilon}} \quad (9)$$

Itt $J(\theta_t)$ a vizsgált θ_t paraméterekre vonatkozó célfüggvény, $\nabla_{\theta} * J(\theta_t)$ a célfüggvény gradiense és ϵ kisértékű állandó, amit azért adnak hozzá, hogy a 0-val való osztást elkerülhessék.

Ezeknek az egyenleteknek meghatározó szerepük van a betanítási időszak során a modellparaméterek továbbfejlesztésére annak az érdekében, hogy az átlagos négyzetes hiba (MSE) veszteséget a lehető legkisebbre szorítsák le, és az ITS értékek előrebecslési pontosságát megnöveljék.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

Összefoglalva, az ebben a tanulmányban elvégzett átfogó elemzés rávilágít a habosított bitumentartalom (FBC), az újrahasznosított aszfaltburkolat (RAP) és az aszfaltkeverékek közvetett húzószilárdsága (ITS) közötti bonyolult összefüggésekre. Az FBC kedvező hatása az aszfaltkeverék mechanikai tulajdonságaira és fokozott teljesítményére, a RAP adagolásából származó fenntarthatósági előnyökkel párosulva, együttesen hozzájárulnak az aszfaltburkolatok általános tartósságához és meghibásodásokkal szembeni fokozott ellenállásához.

A kidolgozott modell az ITS és az azt befolyásoló tényezők (FBC és RAP) közötti kapcsolatot sikeresen ($R^2=0,734$) le tudja képezni, azaz az előre becsült adatok a tényleges mért értékekhez jól illeszkednek.

A modell teljesítményének különböző körülmények között végzett további elemzése azt mutatta, hogy az ITS metrika nedves és száraz körülmények között meglehetősen eltérő viselkedést mutat. A szárazon vizsgált ITS-nél magasabb, 0,78-as R^2 -érték adódott, mint a nedves viszonyok között nyert 0,71 körüli érték. A vizsgált tényezők között nyert korreláció mindegyik esetben alacsonynak ($-0,022$ és $-0,025$ között) adódott.

A lineáris regressziós elemzés és a szupport vektor-regressziós (SVR) modellek vizsgálata azt igazolta, hogy az ITS különböző feltételek melletti előrejelzésre ezek hasznos technikának bizonyultak. Ugyanis ezen modellek értékelésével, beleértve a szórásdiagramokat, a korrelációs elemzéseket és az R^2 mérőszámait, bemutattuk ezeknek a megközelítéseknek a hatékonyságát az aszfaltkeverékek komplex tulajdonságainak jellemzésében.

A Véletlenszerű erdő (Random Forest) és a Neurális Hálózati modellek összehasonlítása bemutatta a gépi tanulási (ML) technikák sokoldalúságát az ITS száraz és nedves viszonyok közötti értékeinek hatékony előrejelzésében.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1]: Roberts, F.L., Mohammad, L.N., & Wang, L.B., 2002. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *J of Mat in Civil Eng*, 14 (4), 279-293. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200214:4279>
- [2]: T. Baghaee Moghaddam & H. Baaj 2018. Application of compressible packing model for optimization of asphalt concrete mix design, *Constr Build Mater*, vol. 159, pp. 530–539, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.004>
- [3]: S. B. Cooper, L. N. Mohammad, S. Kabir, & W. King, 2014. Balanced asphalt mixture design through specification modification: Louisiana's experience, *Trans Res Record*, vol. 2447. National Research Council, pp. 92–100. <https://doi.org/10.3141/2447-10>
- [4]: S. S. Kar, A. K. Swamy, D. T. Tiwari, and P. K. Jain, 2018. Impact of low viscosity grade bitumen on foaming characteristics, *J of the South Afr Inst of Civil Eng*, vol. 60, no. 2, pp. 40–52, <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2018/v60n2a5>
- [5]: L. H. Csanyi, 1957. Foamed asphalt in bituminous paving mixtures, *Highw Res Board Bull*, no. 160.
- [6]: G. Wirtgen, 2012. Wirtgen cold recycling technology Wirtgen GmbH Windhagen, Alemania, 2012.
- [7]: B. A. Williams, A. Copeland, & T. C. Ross, 2018. Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2017.
- [8]: S. S. Kar, D. Tiwari, A. K. Swamy, & P. K. Jain, 2017. Impact of binder on properties of foamed bituminous mixtures, *Proc of Inst of Civil Eng: Const Mater*, vol. 170, no. 4, pp. 194–204, <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00037>
- [9]: M. M. Iwanski, A. Chomicz-Kowalska, & K. Maciejewski, 2020. Resistance to moisture-induced damage of half-warm-mix asphalt concrete with foamed bitumen, *Mat*, vol. 13, no. 3, <https://doi.org/10.3390/ma13030654>
- [10]: M. Hoy, S. Horpibulsuk, and A. Arulrajah, 2016. Strength development of Recycled Asphalt Pavement - Fly ash geopolymers as a road construction material, *Constr Build Mater*, vol. 117, pp. 209–219, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.136>
- [11]: F. Dong, X. Yu, B. Xu, & T. Wang, 2017. Comparison of high temperature performance and microstructure for foamed WMA and HMA with RAP binder, *Constr Build Mater*, vol. 134, pp. 594–601, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.106>

- [12]: J. Li, W. Fu, & H. Zang, 2018 “Design Method for Proportion of Cement-Foamed Asphalt Cold Recycled Mixture,” MATEC Web of Conf, vol. 142, p. 02002, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814202002>
- [13]: Z. Li, P. Hao, H. Liu, & J. Xu, 2019. Effect of cement on the strength and microcosmic characteristics of cold recycled mixtures using foamed asphalt, *J Clean Prod*, vol. 230, pp. 956–965, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.156>
- [14]: N. Bala, M. Napiah, & I. Kamaruddin, 2020. Nanosilica composite asphalt mixtures performance-based design and optimisation using response surface methodology, *Int J of Pav Eng*, vol. 21, no. 1, pp. 29–40, <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1435881>
- [15]: L. P. F. Abreu, J. R. M. Oliveira, H. M. R. D. Silva, D. Palha, & P. V. Fonseca, 2017. Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates, *Constr Build Mater*, vol. 142, pp. 342–353, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.085>
- [16]: M. S. Arefin, T. Quasem, M. Nazzal, A. R. Abbas, & Y. AbuHassan, 2020. Effect of short-term and long-term ageing on dynamic modulus of foamed warm mix asphalt, *Int J of Pav Eng*, vol. 21, no. 4, pp. 524–536, Mar, <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1493202>
- [17]: S. S. Kar, A. K. Swamy, D. Tiwari, & P. K. Jain, 2020. Impact of Chemical Composition on Foaming Characteristics of Asphalt Binder, *J of Trans Eng, Part B: Pav*, vol. 146, no. 3, p. 04020045, <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000196>
- [18]: B. K. Bairgi, U. A. Mannan, & R. A. Tarefder, 2019. Influence of foaming on tribological and rheological characteristics of foamed asphalt, *Constr Build Mater*, vol. 205, pp. 186–195, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.009>
- [19]: M. R. Mohd Hasan, Z. You, H. Yin, L. You, & R. Zhang, 2019. Characterizations of foamed asphalt binders prepared using combinations of physical and chemical foaming agents, *Constr Build Mater*, vol. 204, pp. 94–104, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.156>
- [20]: E. A. Taziani, E. Toraldo, F. Giustozzi, & M. Crispino, 2016. Investigation on the combined effect of fibers and cement on the mechanical performance of foamed bitumen mixtures containing 100% RAP, *Adv in Mater Sci and Eng*, vol. 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/4894351>
- [21]: A. Chomicz-Kowalska & P. Ramiaczek, 2017. Comparative Evaluation and Modification of Laboratory Compaction Methods of Road Base Mixtures Manufactured in Low-emission CIR Technology with Foamed Bitumen and Bitumen Emulsion, in *Proc Eng, Elsevier Ltd*, pp. 560–569. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.066>
- [22]: Y. Hou, Y. Cai, Z. Zang, Z. Qian, & B. Zhao, 2019. Dynamic Characteristics of Warm Mix Foamed Asphalt Mixture in Seasonal Frozen Area, *Adv in Mater Sci and Eng*, vol. 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/1825643>
- [23]: F. V. Guatimosim, K. L. Vasconcelos, L. L. B. Bernucci, & K. J. Jenkins, 2018. Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt, *Road Mater and Pav Des*, vol. 19, no. 2, pp. 385–399, <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1261726>
- [24]: N. Karballaezadeh, D. Mohammadzadeh S, S. Shamshirband, P. Hajikhodaverdikhan, A. Mosavi, & K. wing Chau, 2019. Prediction of remaining service life of pavement using an optimized support vector machine (case study of Semnan–Firuzkuh road), *Eng Appl of Comp Fluid Mech*, vol. 13, no. 1, pp. 188–198, <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1563829>
- [25]: T. Gandhi, W. Rogers, and S. Amirkhanian, 2010. Laboratory evaluation of warm mix asphalt ageing characteristics, *Int J of Pav Eng*, vol. 11, no. 2, pp. 133–142, <https://doi.org/10.1080/10298430903033339>
- [26]: ASTM D692-00, 2004. Standard Specification for Coarse Aggregate for Bituminous Paving Mixtures, 2004, 2 p.
- [27]: EN 12591, 2009. Bitumen and bituminous binders— Specifications for paving grade bitumens, 36 p.
- [28]: F. Kamran, M. Basavarajappa, N. Bala, & L. Hashemian, 2021. Performance evaluation of stabilized base course using asphalt emulsion and asphaltenes derived from alberta oil sands, in *Trans*

Res Rec vol. 2675, no. 10, SAGE Publications Ltd, pp. 764–775.
<https://doi.org/10.1177/03611981211012692>

[29]: V. Vapnik, 1999. The nature of statistical learning theory. Springer science & business media.

[30]: K. Gopalakrishnan, A. M. Asce, & S. Kim, 2010. Support Vector Machines Approach to HMA Stiffness Prediction, *J of Eng Mech* Volume 137, Issue 2 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000214)

[31]: M. Maalouf, N. Khoury, & T. B. Trafalis, 2008. Support vector regression to predict asphalt mix performance, *Int J Numer Anal Methods Geomech*, vol. 32, no. 16, pp. 1989–1996, <https://doi.org/10.1002/nag.718>

[32]: Y. Zhao, K. Zhang, Y. Zhang, Y. Luo, & S. Wang, “Prediction of air voids of asphalt layers by intelligent algorithm,” *Constr Build Mater*, vol. 317, p. 125908, 2022.

[33]: M. Nazemi & A. Heidariapanah, 2016. Support vector machine to predict the indirect tensile strength of foamed bitumen-stabilised base course materials, *Road Mater and Pave Des*, vol. 17, no. 3, pp. 768–778, <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1119712>

[34]: H. Ziari, M. Maghrebi, J. Ayoubinejad, & S. T. Waller, 2016. Prediction of pavement performance: Application of support vector regression with different kernels, *Transp Res Rec*, vol. 2589, pp. 135–145, <https://doi.org/10.3141/2589-15>

[35]: Y. Huang, 2009. Advances in artificial neural networks - Methodological development and application, *Alg*, vol. 2, no. 3. pp. 973–1007, <https://doi.org/10.3390/alg02030973>

[36]: H. Gong, Y. Sun, X. Shu, & B. Huang, 2018. Use of random forests regression for predicting IRI of asphalt pavements, *Constr Build Mater*, vol. 189, pp. 890–897, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.017>

[37]: A. Fathi, M. Mazari, M. Saghafi, A. Hosseini, & S. Kumar, 2019. Parametric Study of Pavement Deterioration Using Machine Learning Algorithms. *Int Airf and Highw Pave Conf*, 12 p.

[38]: D. Daneshvar & A. Behnood, 2022. Estimation of the dynamic modulus of asphalt concretes using random forests algorithm, *Int J of Pave Eng*, vol. 23, no. 2, pp. 250–260, <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1741587>

[39]: H. Gong, Y. Sun, W. Hu, P. A. Polaczyk, & B. Huang, 2019. Investigating impacts of asphalt mixture properties on pavement performance using LTPP data through random forests, *Constr Build Mater*, vol. 204, pp. 203–212, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.198>

[40]: Y. Zhan, J. Q. Li, C. Liu, K. C. P. Wang, D. M. Pittenger & Z. Musharraf, 2021. Effect of aggregate properties on asphalt pavement friction based on random forest analysis, *Constr Build Mater*, vol. 292, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123467>