

■ Közlekedési geotechnika: tendenciák és haladás a digitális korszakban

Ha nincs mérnököd, hogyan kelsz át a folyó túlsó partjára?

„Közlekedési geotechnika: tendenciák és haladás a digitális korszakban” címmel tartotta meg nagy érdeklődéssel várt előadását **António Gomes Correia** professzor a Magyar Geotechnikai Egyesület, az MMK Geotechnikai Tagozata és az MTA Műszaki Tudományok Osztálya közös szervezésű, XXX. Széchy Károly-emlékülésén az MTA Széchenyi téri székházában, ahol exkluzív interjút adott a Mérnök Újságnak.



Rozsnyai Gábor

– **Előadásában említette az ipar 5.0-t. Mit jelent ez a fogalom?**

– Fókuszban az ember. Az ipar szerepének megerősítése a társadalom jólétének támogatásában. A kutatás és az innováció a fenntartható, emberközpontú és rugalmas európai iparra való áttérés szolgálatában. Valójában a 4.0 magasabb szintre emelése, amely már önmagában is összetett dolog, hiszen része a mesterséges intelligencia, a dolgok internete, a big data koncepció, az analitika, a feldolgozott adatok tárolása és hozzáférhetősége, a skálázhatóság, a szenzorok kiépítése, az összeköttetések és a biztonság magasabb szintre emelése, és még sorolhatnám. De a lényeg az, hogy ezek csak eszközök. Mégpedig olyan digitális eszközök, amelyeket a környezetbarát gyártás és a körforgásos gazdaság hatékonysága érdekében használhatunk, illetve annak biztosítására, hogy a mesterséges intelligencia döntéshozatala összhangban legyen az emberi értékekkel, és személyre szabott megoldásokat kínáljon az emberek életének jobbá tételére.

– **Melyek (lesznek) a digitális korszak legfontosabb eszközei?**

– A mesterséges intelligencia és az IoT-érzékelők valós idejű adatokat szolgáltatnak a

szerkezeti állapotfigyeléshez és a földrajzi veszélyek észleléséhez. Az MI által vezérelt digitális ikrek és a gépi tanulás optimalizálják az építkezést, a földmunkákat és a teljesítményszimulációkat az infrastruktúra rugalmassága érdekében, miközben az MI-vel működő robotikus tömörítők önállóan navigálnak az építkezéseken. A számítógépes vizualizáció és a LiDAR segít az akadályok felismerésében, az útvonalak beállításában és a balesetek elkerülésében. Az MI-alapú IoT-hálózatok és LLM-ek² a prediktív karbantartás, az automatizált jelentéskészítés és a hatékony erőforrás-kezelés révén növelik az infrastruktúra élettartamát.

– **Vagyis a teljes digitális eszközkészlet középpontjában a mesterséges intelligencia áll?**

– Erre haladunk, és ennek is sok összetevője van, kezdve az IoT-vel, a felhőalapú számítástechnikával, a kiberbiztonsággal, az automatizált tervezéssel, a szöveg- és beszéd felismeréssel, az önfejlesztő gépek és robotok önállóságának növelésével. Ide sorolom a mélytanulást, a mozgáselemzést, a képfelismerést és helyreállítást. Szerteágazó tudásterületek, amelyeket nem fenyegetésnek, hanem lehetőségnek tekintek; fokozzák a döntéshozatal hatékonyságát, az automatizálást, a hatékonyságot az emberközpontú, fenntartható és rugalmas ipari gyakorlatok előmozdítása érdekében.

– **Melyek a legfontosabb trendek, és hogyan profitálhat ebből a geotechnikával foglalkozó mérnök?**

– A BIM integrálása a tervezésbe és építésbe már zajlik, ennek előnye, hogy a BIM-be integrált szenzorok valós idejű adataival dolgozhatunk, ami óriási segítség lehet például a kivitelezés során. A tervezésnél – a gondos előkészítés és előzetes felmérés ellenére, pontosabban azzal együtt – nem látunk mindent előre, hogy mi vár ránk a terepen. Ez a kockázat a BIM-mel és a szenzorokkal csökkenthető. Fontos a LiDAR használata nagy pontosságú terep- és felszín alatti térképezéshez, ennek előnyeit az MI-alapú InSAR használatakor, a valós idejű mozgások előrejelzésekor és a kockázatértékelés során élvezhetjük. Nem becsülném alá a mesterséges intelligencia/gépi tanulás alkalmazását a prediktív értékelésekhez, ami jól jön a geotechnikai szenzoradatok helyszíni feldolgozásánál. Sokat várok az IoT-alapú – vagyis a dolgok internetét használó – geotechnikai monitoring rendszerek kiterjesztésétől, itt az önérzékelő geoanyagokra és az intelligens szerkezetekre gondoljon elsősorban. A felhőalapú platformok használata az adatok közös megosztásához nem új, de ennek segítségével felgyorsulhat például az öngyógyító anyagok fejlesztése. Szerencsés, ha az adatmegosztáshoz igénybe vesszük a blockchain technológiát. És végül biztató fejlemény a digitális ikrek fokozott használata a kiszámítható teljesítmény és karbantartás érdekében.

– **Mit kell tudni az önérzékelő anyagokról?**

– Az önérzékelő geoanyagok számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos



ANTÓNIO GOMES CORREIA

Építőmérnöki diplomát szerzett a Lisszaboni Műszaki Egyetemen (IST, 1977), doktori fokozatot a l'École Nationale des Ponts et Chaussées-n (Párizs, 1985), és 1998-ban habilitált az IST-n. 1987-ben Manuel Rocha-díjjal tüntették ki, és a Nemzeti Építőmérnöki Laboratórium (LNEC) szakemberévé nevezték ki. 1998-ban megalapította a Geotechnikai Kutatóközpontot az IST keretei között, majd a Minhoi Egyetemen teljes jogú professzorként dolgozott (2003-2020), ahol különböző kulcsfontosságú vezetői feladatokat látott el: a mérnöki kar dékánhelyettese, a kutatóközpont igazgatója, az építőmérnöki PhD-program igazgatója. A Minho Egyetem professor emeritusa 2021-től, valamint a portugál Geotechnikai Társaság tiszteletbeli elnöke 2022-től. Nemzeti és nemzetközi bizottságokban való részvétele révén jelentősen hozzájárult a geotechnika fejlődéséhez, többek között a Portugál Geotechnikai Társaság elnökeként (2004-2008). Kezdeményezője a neves Transportation Geotechnics nemzetközi konferenciasorozatnak, és társalapítója az Intelligens Építés Nemzetközi Társaságának. Szerkesztői tevékenysége is figyelemre méltó: alapító szerkesztője az Elsevier's Transportation Geotechnics folyóiratnak, az Elsevier's Transportation Engineering főszerkesztője. Kiváló tudományos, kutatási és szakmai karrierje során több mint 600 publikációt jegyez (225 a SCOPUS-ban, 30-as H indexszel), elsősorban a közlekedési geotechnika terén.

geoanyagokkal szemben. Például az önérzékelő cementes geokompozitok a pizorezisztivitás-elve alapján saját maguk érzékelik a közlekedési infrastruktúrában a degradációt és a repedéseket, kiküszöbölve a külső érzékelők szükségességét. Ezen a területen figyelemre méltó eredmény volt egy önérzékelő geoanyag kifejlesztése a Minhoi Egyetemen EU-kutatási projektek keretében, amely nemcsak a mechanikai követelményeknek felelt meg, hanem sikeresen észlelte az anyag degradációját és repedését is terheléses körülmények között. A legfontosabb előnyök közé tartozik a valós idejű megfigyelésre való képesség, amely a degradáció és a repedések észlelésével növeli a biztonságot. Emellett csökkenti a karbantartási költségeket azáltal, hogy lehetővé teszi az optimalizált karbantartási ütemezést, és növeli a tartósságot. Emellett az önérzékelő geoműanyagok környezetvédelmi előnyökkel is kecsegtetnek azáltal, hogy minimalizálják a karbantartási tevékenységekhez szükséges erőforrás-felhasználást, és növelik a rugalmasságot azáltal, hogy képesek észlelni és reagálni a külső beavatkozásokra.

– Mitől lesz önérzékelő egy geoműanyag?

– A hagyományos és az önérzékelő anyagok közötti elsődleges különbség az összetételükben rejlik. Az önérzékelő anyagokban a nem szerkezeti tulajdonságot, tehát az érzékelőképességet az elektromosan vezetőképességű töltőanyagok beépítésével érik el. Ennek eredményeként az önérzékelő anyagok a

vezető töltőanyagok jelenlétének köszönhetően képesek reagálni a külső hatásokra. Az elektromosan vezetőképességű töltőanyagokat jellemzően két típusba sorolják: fémalapú és szénalapú. Míg a fémalapú töltőanyagokat – például acélszálak – általában betonalkalmazásokban – például betonburkolatok – használják, addig a szénalapú konduktív töltőanyagok általában alkalmasabbak és hatékonyabbak a geomateriális alkalmazásokhoz. A szénalapú vezetőképességű töltőanyagoknak – alakjuktól és oldalarányuktól függően – különböző típusai léteznek. Ezek közé tartoznak a szén nanocsövek, amelyek lehetnek egy- vagy többfalúak, a szénszálak, a grafén-oxid, a grafit, a grafén és az aktív szén. Amit már tudunk: az önérzékelő cementkötésű geokompozitok keverése és alkalmazása során a fő kihívást a vezetőképességű töltőanyagok diszperziója jelenti. A töltőanyagok hatékonysága az önérzékelő képességek biztosításában olyan tényezőktől függ, mint az oldalarány, az alak, a koncentráció és a diszperzió. Az optimális geotechnikai és elektromos tulajdonságok elérése érdekében pontosan meg kell határozni az optimális vezetőképességű töltőanyagok százalékos arányát. A vezetőképességű töltőanyagok önmagukban vagy kombinációban is alkalmazhatók. A szólag megközelítésben egyfajta vezetőképességű töltőanyagot adnak a geoanyaghoz, míg a kombinált metodika esetén két vagy több töltőanyagot építenek be. A kombinált töltőanyagok szinergikus hatásai miatt általában az utóbbi megközelítést részesítik előnyben, mivel ez többnyire hatékonyabb a geoanyag saját önérzékelő tulajdonságai-

nak fokozásában. Fontos azonban megjegyezni, hogy a vezetőképességű töltőanyagok típusát és mennyiségét különösen gondosan kell kiválasztani az adott geoanyagnak megfelelően, ami alapos elemzést igényel a beépítés előtt. A hulladékanyagok felhasználása – beleértve a CNT-k (szénnanocsövek) előállítását is – elősegítheti a körforgásos gazdaság elveit: intelligensebb, zöldebb és rugalmasabb. Az önérzékelő cementkötésű kompozitokat néhány esetben már alkalmazták a terepen, ám további kutatásokra és vizsgálatokra van azonban még szükség ahhoz, hogy elősegítsük ennek az újszerű önérzékelő anyagoknak a közlekedési infrastruktúrákban való általános alkalmazását.

– **Izgalmas. Említette az InSAR-t: a távérzékelésben, az úrgeodéziában és a geofizikában gyakran használt technológia a szintetikus apertúrájú**

radarfelvételek (SAR) fázisinformáció-tartalmát vizsgáló tudományterület, amelyben a kutató eszköz az elektromágneses spektrum 109–1011 Hz tartományában kibocsátott radarhullám. Miként segíthet ez nekünk a gyakorlatban?

– Az InSAR (interferometric synthetic aperture radar) valójában nem más, mint az adatok nagy teljesítményű távérzékelési technikája, amelyet különböző geofizikai jelenségek megfigyelésére használunk, beleértve a lejtők vagy a terep stabilitásának megfigyelését. Számos előnye van: Az InSAR nagy térbeli felbontást biztosít, ami széles területen teszi lehetővé a felszín deformációjának és változásainak részletes feltérképezését. Centiméteres, sőt milliméteres nagyságrendű változásokat is képes érzékelni. A technológia egyetlen felvétellel nagy területeket tud lefedni, így hatékonyan alkalmazható nagy kiterjedésű geológiai és környezeti jelenségek megfigyelésére, és mivel idősoros adatokat szolgáltat, lehetővé teszi a felszíni deformáció időbeli nyomon követését. Fontos, hogy nem invazív, vagyis ez egy érintésmentes távérzékelési technika, ami azt jelenti, hogy nem feltétlenül a célterülettel való fizikai érintkezés, és ha ez még nem lenne elég, költséghatékony is: az InSAR-adatok viszonylag alacsony költséggel szerezhetőek be a hagyományos földi felmérési módszerekhez képest, amelyek időigényesek és drágák lehetnek. És hogy hol lehet alkalmazni? Például a lejtős talajokon épült autópályák mozgásának feltérképezéséhez, illetve a mesterséges intelligencia segítségével annak kiszámítására, hogy milyen ütemben és mértékben folytatódik a pályatest mozgása, be kell-e avatkozni, és ha igen, mikor és hol.

– Lépünk vissza a digitális ikrekhez: egy termék virtuális másolatának lényege, hogy a fizikai prototípusok építése helyett a digitalizált változattal való interakció lehetősége nagyobb szabadságot ad a kísérletezésben, ugyanakkor gyorsabbá, biztonságosabbá és költséghatékonyabbá teszi a fejlesztést. De esetünkben mit jelent konkrétan?

– A mesterséges intelligenciával (AI), a kiterjesztett valósággal (AR), a virtuális valósággal (VR) és a robotikával kombinálva számos dolgot, például a proaktív beavatkozóso-

kat lehetővé tevő valós idejű megfigyelést, több forgatókönyv tesztelését virtuális környezetben a leghatékonyabb megoldási módszerek meghatározása érdekében, a földmunkák optimalizálását, a geotechnikai eszközök hosszú távú kezelésének segítését, a tervezési hibák automatikus jelzését, a nem biztonságos munkakörülmények felismerését, vagy a lehetséges meghibásodás előrejelzését. Összefoglalva: a digitális ikrek alkalmazása növeli a biztonságot, csökkenti a költségeket és javítja a közlekedési infrastruktúra rugalmasságát.

– Mindezek ellenére az építőmérnöki képzés nem túl népszerű, a világ talán legjobb műszaki egyetemének tartott MIT egyenesen beszüntette ezt a képzést.

– Ha nincs mérnököd, hogyan kelsz át a folyó túlsó partjára? Mi lenne az épített környezetünkkel, az út- és vasúthálózatunkkal, a reptereinkkel, a városainkkal, ha nem gondoskodnánk a megfelelő karbantartásról? Mérnökökre mindig szükség lesz, akik viszont nem ragadhatnak le egyetlen terület mególy beható ismereténél sem. Az építőmérnököknek el kell mélyedniük a társtudományok – anyagtudomány, MI, IT, elektronika, kémia – világában. A lehetőségek tárháza széles: az éghajlatváltozásra válaszul új, fenntartható anyagokat tudunk kifejleszteni, és fényes jövő áll az intelligens és önjavító anyagok és szerkezetek, valamint a fejlett digitális technológiákat, automatizálást, 3D nyomtatást és adatvezérelt döntéshozatalt integráló intelligens építés előtt. Az előadásomban példaként említettem az úthengerek jövőjét. Nem technikus irányítja majd, hanem egy program, amely a szenzorok adatait feldolgozva centiről centire állapítja meg a legjobb metódust az ideális eredmény eléréséhez. A világ átalakul. Európának is újra kell gondolnia a hozzáállását. A diákoknak éppúgy, mint az egyetemeknek, amelyeknek az egyébként nagyon jó elméleti tudást kell közelebb hozni a lehetséges alkalmazásokhoz. A kutatások során tett felfedezéseket innovatív megoldásokká kell alakítani, amelyek elősegítik az ipari fejlődést, támogatják a vállalkozói szellemet, és hozzájárulnak a nemzetek gazdasági fejlődéséhez.

– Lemaradunk? A világ tíz legjobb geotechnikai szakfolyóirata között jegyzett Elsevier's Transportation

Geotechnics szerkesztőjeként nyilvánvan rálátása dolgokra.

– Az amerikai Erol Tutumluer és a kínai Yunmin Chen professzorokkal együtt alkotjuk a főszerkesztői bizottságot. A világ különböző részein aktív szakértők közreműködésével – akik a szerkesztőbizottságot alkotják – hozzájárulunk ahhoz, hogy a közlekedési geotechnika területén kiemelkedő eredményeket érjünk el, amelyek a közutak, autópályák, vasutak és földalatti vasutak, repülőterek és vízi utak geotechnikájának valamennyi aspektusáról szóló elméleti és alkalmazott tanulmányokat tartalmaznak. Nagyon büszkék vagyunk arra, hogy e folyóirat támogatói vagyunk, amely az elmúlt tíz évben hozzájárult a mérnöki terület kiválóságához, és a világ egyik legjobb folyóiratává vált. A kérdésre visszatérve úgy látom, hogy egyrészt a világ különböző kontinensein különböző kihívásokra kell választ adni. A kínaiak jelenleg a legnagyobb kiterjedésű nagysebességű vasúthálózatot építik, míg Franciaországban az első TGV a párizsi Gare de Lyon pályaudvarról 1981 szeptemberében indult el. Azóta több mint négy évtized telt el, és az egész meg kell újítani, ami teljesen más feladat, mint valami újat létrehozni. De nem akarom megkerülni a kérdést. Sokáig Európa rendelkezett a világ legfejlettebb technológiáival, de a gyártást kiszervezte az olcsóbb országokba. Ez túlzottan nagy függőséghez vezetett, egy kicsit túl messzire mentünk a globalizációval. El kell kezdenünk újra termelni valamit. Elismerem, hogy a háború és az emelkedő nyersanyagárak hatása negatív, de változtatnunk kell. Lehet, hogy Európa lassú, de ha nekidurálja magát, akkor nagy dolgokat képes elérni. Optimista vagyok.

– Sok mindennel foglalkozik, de nem tűnik fáradtnak még egy sűrű konferencianap végén sem. Mi a titka?

– A szervezés természetesen fontos, de nem alszom túl sokat – ez szerencsés genetikai adottság –, így több hasznos időm marad másra. Portugál vagyok, és mint a honfitársaim legtöbbje, derűs és nyitott a természetem. Szeretek kommunikálni, de a saját utamat járom, azzal foglalkozom, amit szeretek.

* Az LLM olyan mesterségesintelligencia-rendszer, amelyet hatalmas mennyiségű szöveges adaton (könyveken, weboldalak tartalmán stb.) tanítottak be, és képes nyelvi feladatokat, például szövegértést, generálást vagy fordítást végezni. – A szerk.