



Klimatikus viszonyok hatása a reziliens modulusra I.: Környezeti hatások és talajjellemzők meghatározása

Pap Miklós¹, Mahler András¹, Tóth Csaba²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: pap.miklos@epito.bme.hu, mahler.andras@epito.bme.hu, toth.csaba@epito.bme.hu

KIVONAT

Az úttervezésben gyakran használt reziliens modulus értékét a földmű víztartalma és hőmérséklet eloszlása (fagyás-olvasadás ciklus) jelentősen befolyásolja, melynek számítására több módszert is kidolgoztak. Jelen publikációban Zapata és társai által 2007-ben publikált módszerét mutatjuk be és értékeljük röviden. A geotechnikai gyakorlatban egyre jobban elterjedt a telítetlen közegekkel foglalkozó talajmechanika elméleteinek alkalmazása, mely segítségével a talajok víztartalomtól függő merevségének, alakváltozási tulajdonságainak változása leírhatóvá vált. A Zapata és társai által javasolt összefüggések lehetővé teszik, hogy a különböző befolyásoló tényezők – sokszor költséges és időigényes – közvetlen mérése helyett egyszerűbb vizsgálatok (pl. talajazonosítás) eredményei alapján becsülni lehessen az optimális víztartalom, az optimális telítettség értékeit, a víztartási görbe paramétereit, a telített áteresztőképesség értékét és hővezető-képességet. Jelen cikk Zapata és társai által publikált folyamatok leírása mellett a folyamatok elméleti háttérének rövid bemutatásával, valamint a javasolt tapasztalati összefüggések rövid értékelésével foglalkozik.

Kulcsszavak: áteresztőképesség, hőmérsékleti hatás, reziliens modulus, víztartási görbe

ABSTRACT

The value of resilient modulus often used in road design is significantly influenced by the moisture and temperature distribution of the unbound material (freeze-thaw cycle). Several methods have been developed for the calculation of this effects. In this paper we present the method published by Zapata et al. in 2007. In the geotechnical practice, the theory of unsaturated soil mechanics has become more and more widely used, whereby the change of the stiffness and deformation properties of the soils depends on the water content can be described. The empirical correlations suggested by Zapata et al. (2007) enable to obtain optimum water content, optimum degree of saturation, parameters of the water retention curve, saturated permeability and thermal conductivity from the soil classification tests) instead of their direct measurement. The paper presents the method of Zapata et al. and gives a short introduction of the governing geotechnical processes and evaluates the empirical correlations proposed.

Pap Miklós

Okl. építőmérnök, PhD hallgató BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék.

Mahler András

Okl. építőmérnök, PhD hallgató BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék.

Dr. Tóth Csaba

A Magyar Mérnöki Kamara, a Közlekedéstudományi Egyesület, a Magyar Útügyi Társaság Útpályaszerkezetek Szakbizottság tagja, jelenleg az BME Út és Vasútépítési Tanszék docense. Korábban a Csongrád Megyei Állami Közútkezelő Kht., illetve az Állami Közúti Műszaki és Információs Kht. osztályvezetőjeként a magyar útügyi adminisztrációban dolgozott. Később a Strabag Konzern mérnökeként részt vett az épülő hazai országos közúthálózat minőségellenőrzésében valamint a Konzern nemzetközi és hazai kutatásaiban. Közlekedési építőmérnöki szakértőként, tervezőként, illetve műszaki ellenőrként közreműködött számos hazai burkolat-megerősítési projektben. Kutatási területe: hajlékony útpályaszerkezetek igénybevétele, méretezése, teherbíró-képessége, megerősítése. Publikációinak száma: több mint 50..

1. BEVEZETÉS

Régóta közismert, hogy az úttervezésben sok országban használatos reziliens modulus értéke összefüggésben van a földmű állapotaival (víztartalmával). Több módszert is kidolgoztak a gyakorlat számára annak figyelembe vételére, hogy a klimatikus hatások miként befolyásolják a reziliens modulus értékét. A jelen publikációban Zapata és társai (2007) által javasolt módszer geotechnikai szemszögből kerül vizsgálat és értékelés alá. A módszer eredeti leírása az alábbi cikkben található: Zapata C. E., Andrei D., Witczak M. W., Houston W. N. (2007) Incorporation of Environmental Effects in Pavement Design. Road Materials and Pavement Design Vol.8:4 pp. 667-693.

A következőkben bemutatjuk a jelenség mögött álló folyamatok talajmechanikai hátterét, a talajjelmezők és klimatikus hatások meghatározási módszerét, a hivatkozott anyagban javasolt számítási lépéseket, illetve a módszer előnyeit és hátrányait, valamint röviden kitérünk annak várható megbízhatóságára, használhatóságára is.

2. TELÍTETLEN KÖZEGEKEL FOGLALKOZÓ TALAJMECHANIKA ELMÉLETI ÁTTEKINTÉSE

2.1. FESZÜLTSGVÁLTOZÓK TELÍTETLEN TALAJOK ESETÉN

A hétköznapi gyakorlatban is közismert tény, hogy a talaj víztartalma befolyásolja annak alakváltozási tulajdonságait (merevségét) és szilárdságát. Bizonyos talajok esetén a víztartalom hatása jelentősebb, más talajok esetén pedig a kevésbé meghatározó. Előbbire jó példaként szolgálnak a kötött talajok utóbbi pedig inkább a szemcsés talajokra jellemző.

A hagyományos talajmechanikai megközelítésben a talajban ébredő feszültségeket – Terzaghi képletével – hatékony és a semleges feszültséggel írjuk le:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

ahol:

σ - a teljes feszültség

σ' - a hatékony (szemcsevázon áthatódó) feszültség

u - a semleges feszültség (pórusvíznyomás)

Ez a megközelítés jól használható telített talajok esetén, telítetlen talajoknál azonban a helyzet ennél összetettebb: a talajszemcsék hézagait víz és levegő tölti ki, így a pórusvíznyomás mellett a póruslevegő nyomását is figyelembe kell venni. Az egyszerűség kedvéért tekintsük azt az állapotot, amikor a levegő fázis folytonos és összeköttetésben van a légkörrel, azaz nyugalmi állapotban a póruslevegő-nyomás megegyezik az atmoszférikus nyomással. Ebben az esetben a talajszemcsék szegleteiben lévő víz a meniszkusz-hatás révén egyfajta kötést (kohéziót) biztosít a talajszemcsék közt. Minél kisebb a víz mennyisége a talajszemcsék érintkezési pontjánál, annál jelentősebb ez hatás. A másik véglét, mikor

az érintkezési pont körül a hézagot víz tölti ki (nincs víz-levegő határfelület); ez esetben az összetartó erő megszűnik. Ezeket az állapotokat szemlélteti az 1. ábra.

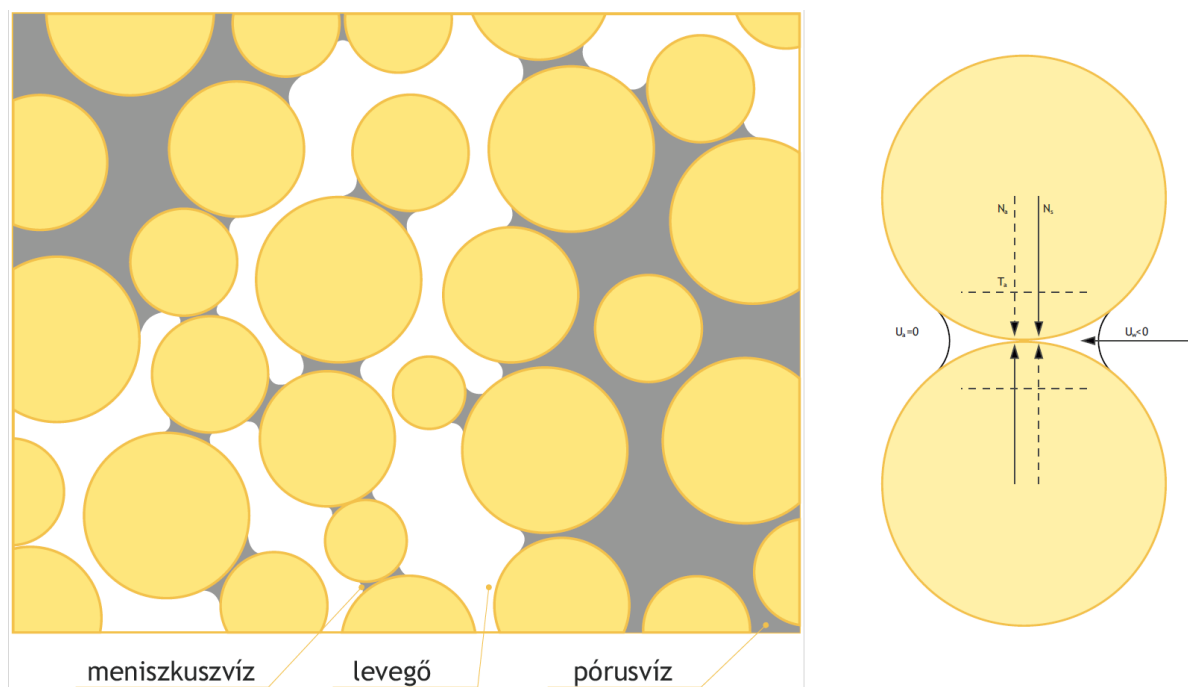
A meniszkusz hatást az okozza, hogy a talajok érintkezési pontjaiban lévő pórusvíznyomás kisebb, mint a póruslevegő nyomása. A fizikai jelenség hasonló a hajszálcövesességnél tapasztalt jelenséggel, mikor is (nedvesítő folyadék esetén) a hajszálcsőben a folyadék felemelkedik. A kapilláris emelkedést létrehozó húzóerő a cső falában reakcióerőt ébreszt, melynek függőleges komponense nyomófeszültséget generál.

Tekintettel arra, hogy talajmechanikában a légköri nyomást tekintjük referenciafeszültségnek ($u_a=0$), az ennél kisebb pórusvíznyomást negatív értékekkel írjuk le, és „negatív nyomás” helyett szívásnak nevezzük. A szívás a póruslevegőnyomás és a pórusvíznyomás különbségeként lehet számítani:

$$S = u_a - u_w \quad (2)$$

A szívást – a hatékony feszültséghez hasonlóan – egyfajta adott mélységre jellemző átlagértékként vesszük figyelembe.

Az említett meniszkusz hatás okozza pl. homokoknál kialakuló „látszólagos kohéziót”; az $S_r=0,2-0,3$ telítettségi foknál (mikor a hézagok 20-30%-át tölti ki a pórusvíz) a szegletekben lévő víz összetartó hatása miatt a száraz vagy telített állapotban ideálisan szemcsés (kohézió nélküli) talajban is kohézió mutatható ki. Ez az oka, annak is, hogy ilyen víztartalom mellett lehetséges homokvár építése, de az a homok kiszáradásával elveszti stabilitását. Hasonló módon a víztartalom a talajok alakváltozási tulajdonságait is befolyásolja.



1. ábra: A meniszkusz hatás

A gyakorlatban, telített talajok esetén tehát több feszültségváltozó használata szükséges. A nemzetközi szakirodalomban számos ajánlás létezik, de nem alakult ki egy általánosan elfogadott számítási eljárás. Jelen anyagban egy egyszerű, de szemléletes módszert mutatunk be a szívás hatásának figyelembe vételére. Bishop (1959) javasolta, hogy a telítetlen talajok esetén a hatékony feszültséget a szívás hatásával korrigáltan vegyék figyelembe (így nem szükséges két független feszültségváltozó használata). Az általa javasolt képlet:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + x(u_a - u_w) \quad (3)$$

ahol:

σ' - a Bishop hatékony (szemcsevázon átadódó) feszültség

σ - a teljes feszültség

χ - a telítettségtől függő tényező (jelen példában egyszerűsítésként legyen $\chi = \text{Sr}$)

u_a - a póruslevegő-nyomás

u_w - a pórusvíznyomás

A Bishop féle hatékony feszültség tehát két komponensből áll. Egyrészt az önsúly hatására a szemcsevázon átadódó feszültségből, másrészt a szívás okozta hatékony feszültség többletből. Ha a fenti egyenletbe behelyettesítjük a teljesen száraz ($S_r=0$) vagy telített ($S_r=1$)

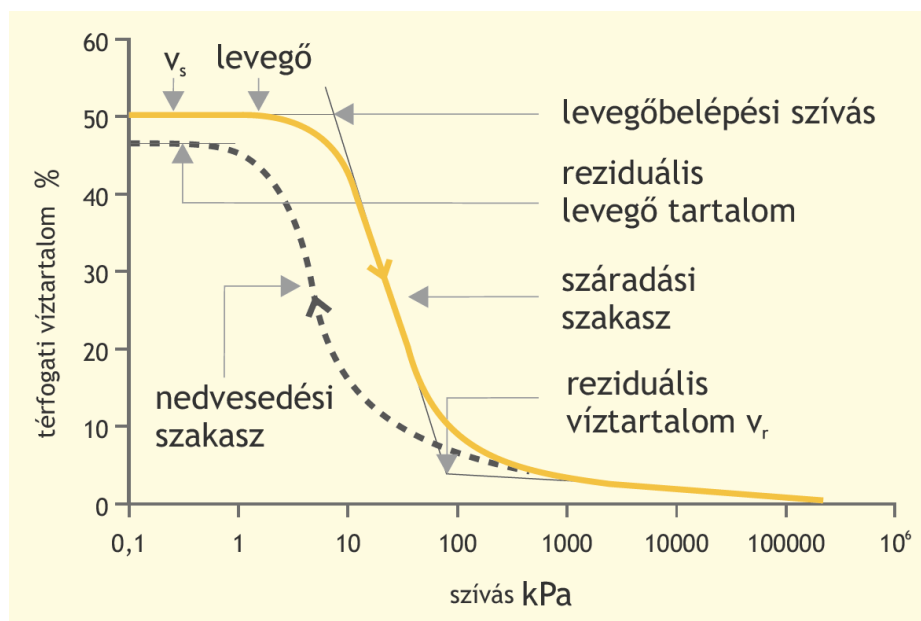
állapothoz tartozó jellemzőket akkor a Terzaghi féle hatékony feszültséget kapjuk vissza, viszont a kettő között az egyenlet nagyobb hatékony feszültséget eredményez. Azaz a telítetlenség okozta szívás tekinthető egyfajta hatékony feszültség növekedésnek is.

A normálfeszültség telítetlen talajok esetén meghatározható a Bishop hatékony feszültséggel is. Ez esetben terepszint közeli talajok esetén is lehet nagy a feszültség a szívást figyelembe vevő komponens miatt; a nagyobb hatékony feszültség pedig nagyobb összenyomódási modulust – azaz egységnyi terhelés hatására kisebb alakváltozást – eredményez.

Útépítési feladatok esetén, különösen útpályaszerkezetek méretezésénél a takarásból adódó hatékony feszültség a kis mélyég miatt csekély, a szívásból adódó komponens viszont jelentős lehet. Ennek következményeként – különösképpen számottevő agyagtartalommal rendelkező talajok esetén – a víztartalom (szívás) változása jelentős mértékben képes megváltoztatni az összenyomódási modulus értékét.

2.2. VÍZTARTÁSI GÖRBE

A víztartási görbe a legfontosabb telítetlen talaj függvény, mely a talaj víztartalmát ábrázolja a szívás függvényében szemilogaritmusos koordináta-rendszerben. Az alakja és lefutása a talajok szemeloszlása mellett jelentősen függ attól, hogy a talaj száradási vagy nedvesedési állapotban található (2. ábra). A víztartási görbéket széles körben alkalmazzák a telítetlen talajok tulajdonságainak meghatározására, így sarkalatos elemévé váltak a telítetlen talajmechanika geotechnikai gyakorlatba történő bevezetésének.



2. ábra: A száradási és nedvesedési víztartási görbe (Fredlund és tsai., 2012)

A víztartási görbét két jellegzetes pontja három jól elkülöníthető szakaszra bontja

(2. ábra). Az első tartomány, amikor a szívás értéke kisebb, mint a levegő belépési szívás, ilyenkor a talaj gyakorlatilag telített állapotú, így ez a szakasz közel vízszintes. A második tartományon, az átmeneti zónában a szívás értéke fokozatosan nő a levegő belépési szívás értéke fölött, a víztartalom pedig nagymértékben csökken, miközben a mintában nő levegőtartalom. Az utolsó szakaszon a görbe ellapul, azaz a reziduális szívás érték felett a reziduális zónában a víztartalom csak kismértékben csökken. Ezek a tartományok és szakaszoló pontok mind száradási, mind nedvesedési állapotban megtalálhatóak és elkülöníthetők.

A víztartási görbe laboratóriumi mérése során a görbe néhány pontját tudjuk csak felrajzolni, mivel csak adott szívás értékhez tudunk víztartalom értéket meghatározni. Ezért a felhasználhatóság érdekében szükséges a mért pontokra matematikailag leírható függvényt illeszteni. Számtalan empirikus összefüggés áll rendelkezésre, hogy az adott szívás értékhez a megfelelő paraméterek segítségével meghatározzuk a víztartalmat, ezek közül Van Genuchten (1980) és Fredlund és Xing (1994) modelljét alkalmazzák a leggyakrabban.

3. REZILIENS MODULUST BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK ZAPATA ÉS TÁRSAI (2007) ALAPJÁN

A környezeti hatások jelentős szerepet játszanak a rugalmas és a merev burkolatok teljesítőképességében. A pályaszerkezet teherbírását külső és belső tényezők is befolyásolják. A külső tényezők közé sorolható a csapadék, a hőmérsékletváltozás, a talajvízszint mélysége, a fagyás és olvadás ciklusok hatása, melyek jelentős hatással bírnak a pályaszerkezet teherbírására. A pályaszerkezet reakcióit ezekre a külső hatásokra a belső tényezők befolyásolják, melyek közül a rétegek nedvesség- és fagyérzékenysége, szivárgási tényezője a meghatározó. A klimatikus hatásokat figyelembe vevő tervezési módszerek a pályaszerkezet nedvesség és hőmérséklet profiljának változása alapján számítják a reziliens modulus értékét

3.1. TÖMÖRÍTETT, KÖTŐANYAG NÉLKÜLI TALAJ TULAJDONSÁGAI

3.1.1. TÖMEG- ÉS TÉRFOGATI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA

A számítás kiinduló paraméterei a maximális száraz térfogatsűrűség (ρ_{dmax}), a fajsúly (G_s) és a vizsgált anyag optimális víztartalom értéke (w_{opt}). Ezen adatok felhasználásával az összes többi tömeg- és térfogati jellemző számítható. Az első szinten körültekintő laboratóriumi vizsgálattal szükséges a fent említett paraméterek ($\rho_{dmax}, w_{opt}, G_s$) meghatározása összhangban a kötőanyag nélküli rétegekre vonatkozó szabványos előírásokkal: AASHTO T180 az alap rétegekre, AASHTO T99 és AASHTO T100 a többi rétegre. Ha laboratóriumi mérés nélkül szeretnénk meghatározni a bemenő adatokat, akkor a második szinten a szükséges paramétereket más módszerrel kell adoptálni. Ezen a szinten meg kell adni a 60 % áthullott tömeghez tartozó szemcseátmérőt (D_{60}), a 0,074 mm lyukbőségű szitán áthullott mennyiséget (P_{200}) és a plasztikus index értékét (PI, magyar szakirodalomban I_p). Ezzel kapcsolatban megjegyezzük, hogy az amerikai gyakorlatban a 0,074 mm a finom és durvaszemcsés talajok közti határvonal, azaz ez gyakorlatilag a finomszemcsé tartalomnak is tekinthető (magyar szakirodalomban 0,063mm használatos).

Ezekből a paraméterekből, az EICM (Enhanced Integrated Climatic Model) alapján számítani lehet a $\rho_{dmax}, w_{opt}, G_s$ kiinduló értékeket a következő összefüggésből (Witczak és társai, 2000):

$$WPI = \frac{P_{200} \cdot PI}{100} \quad (4)$$

A WPI tehát egy talajtípusra jellemző mérőszám: szemcsés talajok esetén, ahol a plaszticitási index nem határozható meg ($PI=0$) az értéke nulla, kötött talajok esetén pedig nagyobb, mint zérus. A finomszemcsék részarányának illetve a plaszticitási index növekedésével – azaz ahogy a talaj egyre kötöttebbé válik – a WPI értéke növekszik.

A második szinten a G_s számítására a következő képlet áll rendelkezésre:

$$G_s = 0,041(WPI)^{0,29} + 2,65 \quad (5)$$

ahol:

G_s - a szilárd rész testsűrűségének és a víz sűrűségének hányadosa (ρ_s/ρ_w , dimenzió nélküli érték)

A G_s értéke tehát – mivel a víz sűrűsége $\rho_w=1\text{g/cm}^3$ – megegyezik a magyar gyakorlatban is használatos testsűrűség értékével. Tekintettel arra, hogy ennek értéke csak kevésbé változik, a gyakorlatban ezt ritkán határozzuk meg méréssel. Szemcsés talajok (kavicsok, homokok) esetén általában ennek értékét 2,65-re vesszük fel; ezzel jó egyezést mutat a javasolt képlet, hiszen a talajtípusnál a WPI értéke 0, így a G_s -re a képlet szintén 2,65-ös értéket ad. Kötött talajok esetén a képlet a WPI-vel („kötöttséggel”) növekvő értéket, kövér agyagok esetén is $G_s < 2,78$ értéket ad, ami valamivel kisebb, mint a hazai gyakorlatban megszokott 2,80-as érték. Összességében megállapítható, hogy a korreláció szemcsés és átmeneti talajokra is jó értéket ad, erősen kötött talajok esetén pedig minimálisan kisebbet ad az itthoni gyakorlatban használt értéknél. Az optimális víztartalom w_{opt} értéke a WPI érték függvényében és a réteg funkciója alapján a következő összefüggésekkel határozhatók meg: Ha $WPI > 0$ (kötött talajok):

$$w_{opt} = 1,3(WPI)^{0,73} + 11 \quad (6)$$

A számítást elvégezve a jellemző kötött talajokra azt tapasztaltuk, hogy gyengén kötött talajok esetén (homokos iszap, iszap, sovány agyag) a képlet elég jól közelíti a „megszokott” értékeket, viszont erősen kötött talajoknál (közepes agyag, kövér agyag) számottevőek az eltérések.

Ha $WPI=0$:

$$w_{opt}(T99) = 8,6425(D_{60})^{-0,1038} \quad (7)$$

Ha a réteg nem az alapréteg:

$$w_{opt} = w_{opt}(T99) \quad (8)$$

Ha a réteg az alapréteg:

$$\Delta w_{opt} = 0,0156[w_{opt}(T99)]^2 - 0,14565 \cdot w_{opt}(T99) + 0,9 \quad (9)$$

$$w_{opt} = w_{opt}(T99) - \Delta w_{opt} \quad (10)$$

Nem alapréteg esetén a képlet az optimális víztartalmat a $w_{opt}=6-11\%$ tartományban adja meg, mégpedig úgy, hogy nagy D_{60} esetén ad kisebb értéket és kis D_{60} esetén nagyobb. Ez a tartomány, illetve a tendencia megfelelőnek mondható, ugyanakkor szem előtt kell tartani, hogy a talaj graduáltsága is befolyásolhatja a w_{opt} értékét. Összességében a képlet egy jó előzetes iránymutatásnak tekinthető.

A maximális száraz térfogatsűrűség (ρ_{dmax}) becsléséhez első lépésben a tömörítés szempontjából optimális telítettségi fok (S_{opt}) meghatározását kell elvégezni az alábbi képlettel:

$$A_{opt} = 6,752 \cdot (WPI)^{0,147} + 78 \quad (11)$$

A hazai tapasztalat azt mutatja, hogy az optimális telítettség 65-85 % körüli; szemcsés talajoknál általában alacsonyabb, kötött talajoknál pedig magasabb. A javasolt képlet szemcsés talajokra ($WPI=0$) minden esetben $S_{opt}=78\%$ értéket ad, ez túlzónak tűnik, ez az érték inkább 70-75 % körül szokott lenni. Kötött talajok esetén a képlet $S_{opt}=85-95\%$ eredményez; a gyengén kötött talajok a tartomány alján, az erősen kötött talajok a tartomány felső részén helyezkednek el. Ezek az értékek is túlzónak tűnnek, a

hazai szakirodalomban – hasonló tendenciák mellett – ennél mintegy 10 %-kal alacsonyabb értékek jellemzőek.

Az eddig meghatározott értékekből a maximális száraz térfogatsúly a talajmechanikában megfogalmazott összefüggések segítségével az alábbi képlet szerint meghatározható:

$$\rho_{d,max,comp} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{w_{opt} G_s}{S_{opt}}} \quad (12)$$

ahol:

ρ_w - a víz térfogatsúlya

Ha a réteg tömörített:

$$\rho_{d,max} = \rho_{d,max,comp} \quad (13)$$

Ha a réteg termett talaj, akkor:

$$\rho_d = 0,90 \cdot \rho_{d,max,comp} \quad (14)$$

Az előző korrelációkkal számított $\rho_{d,max}$ értékek, különböző talajtípusonként az alábbiak szerint alakulnak:

– közepes és kövér agyagok: $\rho_{d,max} = 15-18 \text{ kN/m}^3$ (1,5-1,8 g/cm³)

– sovány agyagok: $\rho_{d,max} = 17-18,5 \text{ kN/m}^3$ (1,7-1,85 g/cm³)

– iszapok: $\rho_{d,max} = 18,5-19 \text{ kN/m}^3$ (1,85-1,9 g/cm³)

– finomhomokok: $\rho_{d,max} = 19,5-20 \text{ kN/m}^3$ (1,95-2,0 g/cm³)

– homokok: $\rho_{d,max} = 20-21 \text{ kN/m}^3$ (2,0-2,1 g/cm³)

– homokos kavicsok: $\rho_{d,max} = 21-22 \text{ kN/m}^3$ (2,1-2,2 g/cm³)

Ezek az értékek elfogadhatóan megegyeznek a szakirodalmi ajánlásokkal.

3.1.2. TELÍTETT VÍZÁTERESZTŐ-KÉPESSÉG MEGHATÁROZÁS

A telített vízáteresztő-képesség szükséges, hogy meghatározzuk az időben változó nedvességprofil a tömörített, kötőanyag nélküli szerkezetben, és hogy számítsuk a drénezés jelleggörbét. Egyes szinten az áteresztőképesség közvetlen mérése ajánlott. A második és harmadik szinten a következő korrelációk javasoltak:

Ha $0 \leq \text{WPI} < 1$

$$k_{sat} = 10^{[-1,11275(\log D_{60}+2)^2 + 7,2816(\log D_{60}+2)] - 11,29791} [\text{cm/s}] \quad (15)$$

Az előző egyenlet $D_{60} < 0,75 \text{ mm}$ esetén érvényes. Ha $D_{60} > 0,75 \text{ mm}$, akkor $D_{60} = 0,75 \text{ mm}$ érték alkalmazandó.

Ha $\text{WPI} \geq 1$:

$$k_{sat} = 710^{[0,0004(P_{200}PI)^2 - 0,0929(P_{200}PI) - 6,56] - 11,29791} [\text{cm/s}] \quad (16)$$

Az áteresztőképességi együttható közismerten a legváltozékonyabb talajparaméter, ami ~10 nagyságrendnyi tartományban mozog. Egy rétegre jellemző érték meghatározása még laboratóriumi vizsgálatokkal is kb. egy nagyságrendnyi bizonytalansággal lehetséges. Számos tapasztalati összefüggés áll rendelkezésre a 'k' értékének talajazonosítási eredményekből történő becslésére, illetve a különböző eljárások megbízhatóságának értékelésére.

Szemcsés talajok esetén általában a finomrésztartalom befolyásolja leginkább az áteresztőképességet, ezért a legtöbb (szinte az összes) módszer a d_{10} értékét használja bemenő paraméterként. Az itt javasolt

képlet ezzel ellentétben a D_{60} értékére (egyfajta „legjellemzőbb” szemcseméretre) támaszkodva adja meg a becsült k értéket – így pl. egy agyagos homok és finomszemcse-mentes homok között nem tesz különbséget, holott azok áteresztőképessége 3-4 nagyságrenddel is eltérhet. Szembetűnő továbbá, hogy $\sim 0,3-0,4$ mm-nél nagyobb D_{60} értékeknél a képlet túlzottan magas értéket ad.

Kötött talajoknál $k \approx 3 \cdot 10^{-9} - 10^{-12}$ m/s tartományban szórnak az értékek. A kövér agyagokhoz tartozó érték a gyakorlatban használt értékekkel jól egybevág, a gyengén kötött rétegek esetén kijövő érték viszont nagyobb az ilyen talajokra általában jellemzőnél.

Összességében megállapítható, hogy a javasolt összefüggések a fő tendenciát (kisebb szemcséjű talajok áteresztőképessége kisebb) jól visszaadják azonban a konkrét számértékek inkább csak nagyon durva becslésnek tekinthetők.

3.1.3. SZÁRAZ TERMÍKUS VEZETŐKÉPESSÉG ÉS SZÁRAZ HŐKAPACITÁS MEGHATÁROZÁSA

száraz termikus vezetőképesség meghatározására első szinten a ASTM E1952 szerinti közvetlen mérés ajánlott. Hármasszinten minden talajtípusra elérhető az érték, melyek a 1. táblázatban láthatók.

A száraz hőkapacitás meghatározására első szinten a ASTM E2766 szerinti közvetlen mérés ajánlott. Hármasszinten a felhasználó választja ki a tervezési értéket, melyek korábbi mérési eredményeken alapulnak. A tipikus értéktartomány $0,71-0,84$ kJ/(kg·K).

1. táblázat: A kötőanyag nélküli réteg száraz hőkapacitása

Talajtípus	Tartomány (W/m·K)	Ajánlott (W/m·K)
A-1-a	0,38-0,76	0,52
A-1-b	0,38-0,76	0,47
A-2-4	0,38-0,42	0,40
A-2-5	0,38-0,42	0,40
A-2-6	0,35-0,40	0,38
A-2-7	0,28-0,40	0,35
A-3	0,43-0,69	0,52
A-4	0,29-0,40	0,38
A-5	0,29-0,40	0,33
A-6	0,28-0,38	0,31
A-7-5	0,16-0,29	0,23
A-7-6	0,16-0,29	0,21

3.1.4. A VÍZTARTÁSI GÖRBE PARAMÉTEREI

A víztartási görbe a talaj mikro- és makropórusainak víztároló-képességét jellemzi a szívás függvényében (Fredlund és társai, 1995). Ezt a kapcsolatot általában a víztartalom, a térfogati víztartalom vagy a telítettség és szívás függvényében ábrázoljuk. Számos tanulmány készült a víztartási görbe különböző módszerrel történő közelítéseinek összehasonlításáról (Leong és Rahardjo, 1996; Zapata, 1999), melyek rávilágítanak, hogy a korábban említett Fredlund és Xing (1994) által bemutatott modell jó közelítés mutat a meglévő adatbázissal.

Egyes szinten a víztartási görbe közvetlen mérése, azaz a szívás és térfogati víztartalom adatpárok közvetlen meghatározása szükséges. A görbe mért pontokra történő nem lineáris illesztésével meghatározhatók a modellhez szükséges paraméterek a_f, b_f, c_f és h_r az alábbi Fredlund és Xing (1994) modell felhasználásával:

$$v_w = \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)}\right) \cdot \left(\frac{1}{\left[\ln\left[e + \left(\frac{h}{a_f}\right)^{b_f}\right]\right]^{c_f}}\right) \quad (17)$$

ahol:

v_{sat} - telített térfogati víztartalom, mely a következő egyenletekből számítható:

$$v_{opt} = \frac{w_{opt} \gamma_{dmax}}{\gamma_{water}} \quad (18)$$

$$S_{opt} = \frac{v_{opt}}{1 - \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_{water} G_s}} \quad (19)$$

$$v_{sat} = \frac{v_{opt}}{S_{opt}} \quad (20)$$

Kettes szinten az EICM a víztartási görbe paramétereket a korábban ismertetett WPI és D_{60} értékekből származtatja (Zapata, 1999; Zapata és társai, 1999).

Ha $WPI > 0$:

$$a_f = 0,00364 \cdot (WPI)^{3,35} + 4 \cdot WPI + 11 [kPa] \quad (21)$$

$$\frac{b_f}{c_f} = -2,313 \cdot (WPI)^{0,14} + 5 \quad (22)$$

$$c_f = 0,0514 \cdot (WPI)^{0,465} + 0,5 \quad (23)$$

$$\frac{h_r}{a_f} = 32,44 \cdot e^{0,0186(WPI)} \quad (24)$$

Ha $WPI = 0$

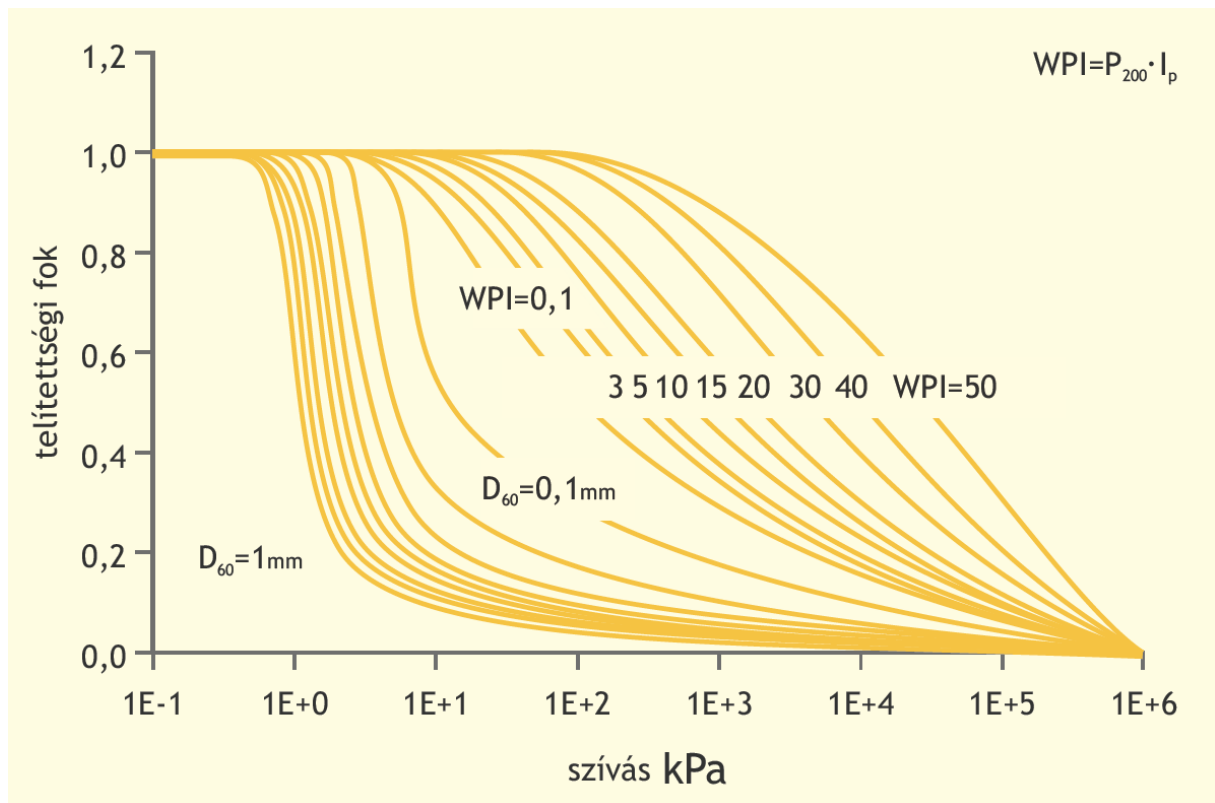
$$a_f / 0,8627 \cdot (D_{60})^{-0,751} [kPa] \quad (25)$$

$$\bar{b}_f = 7,5 \quad (26)$$

$$c_f = 0,1772 \ln(D_{60}) + 0,7734 \quad (27)$$

$$\frac{h_r}{a_f} = \frac{1}{D_{60} + 9,7 \cdot 9,7 \cdot e^{-4}} \quad (28)$$

Hármas szinten a WPI és D_{60} felhasználásával számíthatók a víztartási görbe paraméterei. A 3. ábra a különböző a WPI értékhez és D_{60} átmérőhöz tartozó víztartási görbéket mutatja. Ezek jól visszaadják a szemcsés és kötött talajokra jellemző víztartási görbe karakterisztikáját, bár itt is megjegyzendő, hogy szemcsés talajok esetén kizárólag a D_{60} figyelembe vétele valószínűleg nem elégséges a víztartási görbe pontosabb becsléséhez.



3. ábra: A WPI és D60 értékek alapján becsült víztartási görbék

A termett talaj tulajdonságainak jellemzéséhez általában nem szükséges az első szinten előírt közvetlen mérés. Ebből adódóan a termett talajhoz elegendő a PI (magyar szakirodalomban I_p), P_{200} , P_4 (4,76 mm átmérőjű szitán áthullott mennyiség) és D_{60} meghatározása.

3.2. HŐMÉRSÉKLETI HATÁSOK

Míg a nedvességtartalom elsősorban a talajrétegek viselkedése szempontjából fontos, addig a hőmérséklet minden érintett réteg (aszfalt, beton, talaj) esetén szignifikáns. Az aszfalt esetén például a hőmérséklet az a tényező, amely a merevséget meghatározza, talajok esetén pedig a fagyás-olvadás hatása bír kiemelkedő jelentőséggel. A leírt számításhoz a hő transzport számítását egy véges differenciák módszerén alapuló szoftver segítségével végzik. A burkolati rétegek esetén a hővezetési tényező és a hőkapacitás ezekben a számításokban konstans, azonban talajok esetén a víztartalom és a fagyás függvényében változik. Input paraméterként minden esetben a száraz anyagra jellemző hőkapacitás és hővezetési tényező megadása szükséges. A modell segítségével becsülhető a fagybehatolás illetve az olvadás is.

Mint minden szimulációnál az anyagjellemzők mellett alapvető fontosságú a vizsgált rétegrend alsó és felső határánál figyelembe veendő peremfeltételek helyes megadása. Jelen esetben ez elsősorban a környezeti hatások (hőmérséklet, napsütés, szél stb.) következtében a be- és kilépő hőenergiát jelenti. Az energia egyensúly számításához az alábbi bemenő paraméterek szükségesek:

- bejövő rövidhullámú sugárzás (Q_i);
- visszavert rövidhullámú sugárzás (Q_r);
- bejövő hosszuhullámú sugárzás (Q_a);
- kilépő hosszuhullámú sugárzás (Q_e);
- hőáramlás (Q_c);
- transpiráció, kondenzáció, párolgás és szublimáció hatásai (Q_h);
- talaj által elnyelt hő (Q_3).

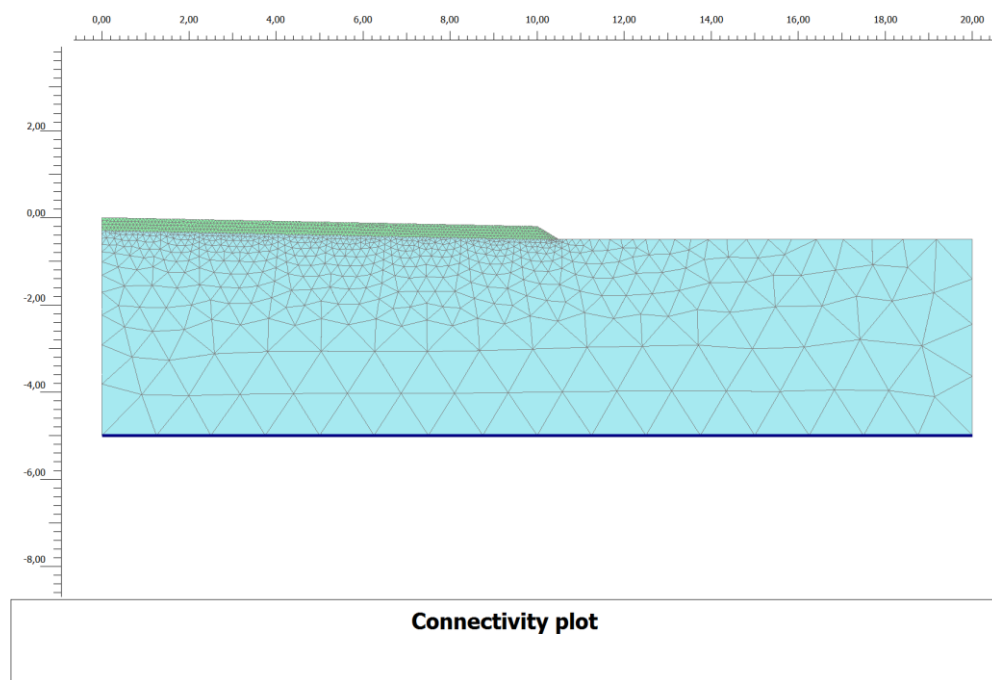
Az említett hatások közül a transpiráció, kondenzáció, párolgás és szublimáció hatásait a bemutatott program elhanyagolja. A többi hatás meteorológiai, illetve tapasztalati adatok alapján megadható vagy becsülhető.

A hőmérsékleti hatások számításával kapcsolatban megjegyezzük, hogy számos piacon elérhető épületfizikai és geotechnikai szoftver is képes hasonló számítások elvégzésére. Ezek előnye lehet, hogy akár két- vagy háromdimenziós problémák kezelésére is alkalmasak, így összetettebb esetekben is jól használhatók. A geotechnikai szoftverekkel ezen túlmenően a mechanikai viselkedést is figyelembe lehet venni ezekben a számításokban. Példaként bemutatjuk egy egyszerűsített probléma geotechnikai véges elemes számítását. Ebben egy 30 cm vastagságú 2 % lejtésű aszfaltréteg található homogén (homok) altalajon,

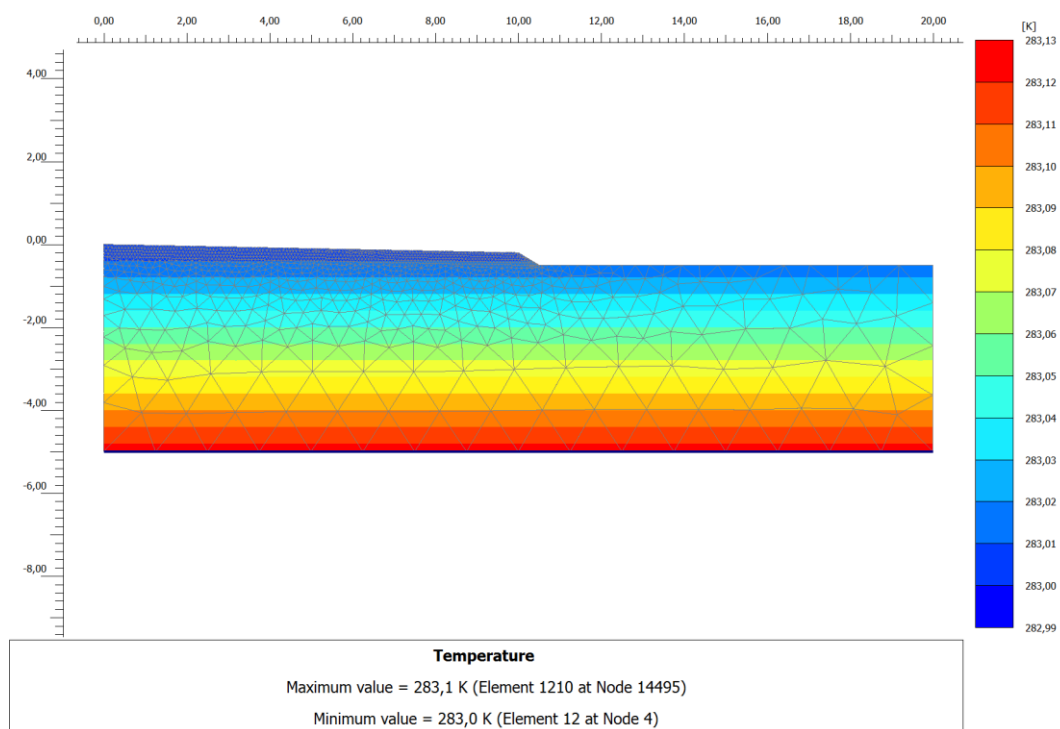
5 m-es talajvízmélységgel. A bal oldali peremfeltételeket úgy állítottuk be, hogy az szimmetria tengelynek tekinthető. A külső hőmérséklet változását pedig a következők szerint adtuk meg:

- a kiindulási levegő hőmérséklet: $T_{\text{levegő}} \approx 10\text{ °C}$
- a levegő ezután 10 nap alatt egyenletes hűl le -10 °C -ra
- a levegő hőmérséklete 10 napig nem változik ($T_{\text{levegő}} \approx -10\text{ °C}$)
- a levegő ezután 10 nap alatt egyenletes melegedik fel 10 °C -ra

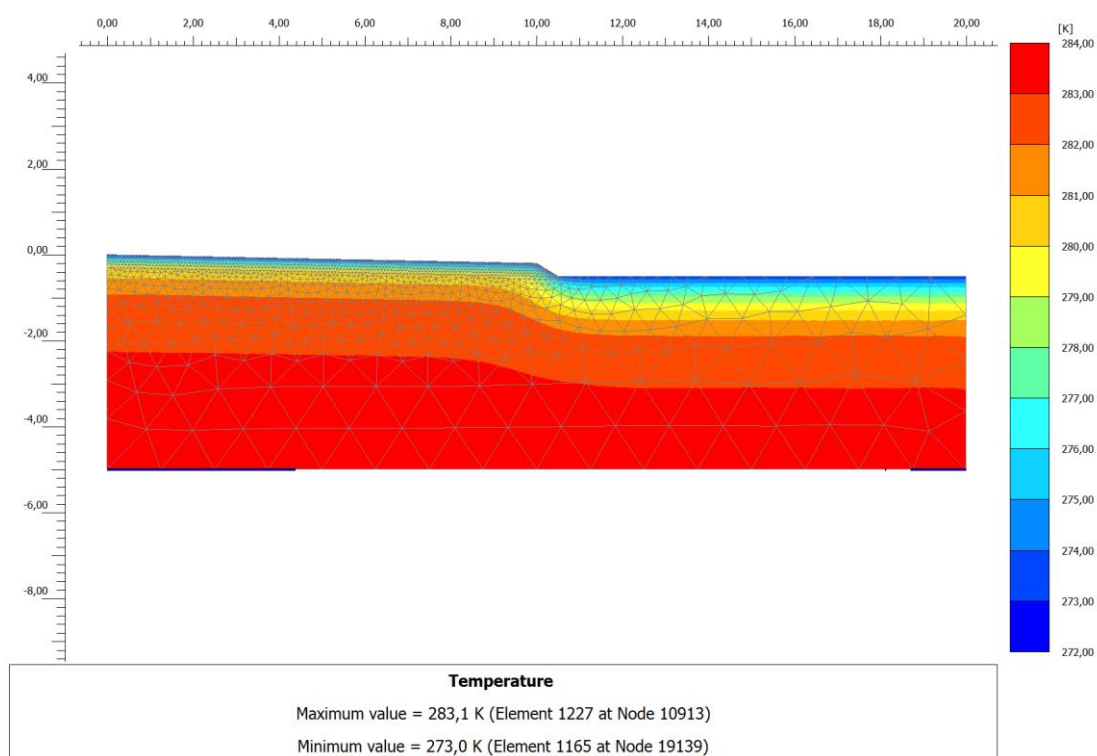
A számítás véges elemes modelljét és eredményeit a 4-10. ábrákon mutatjuk be.



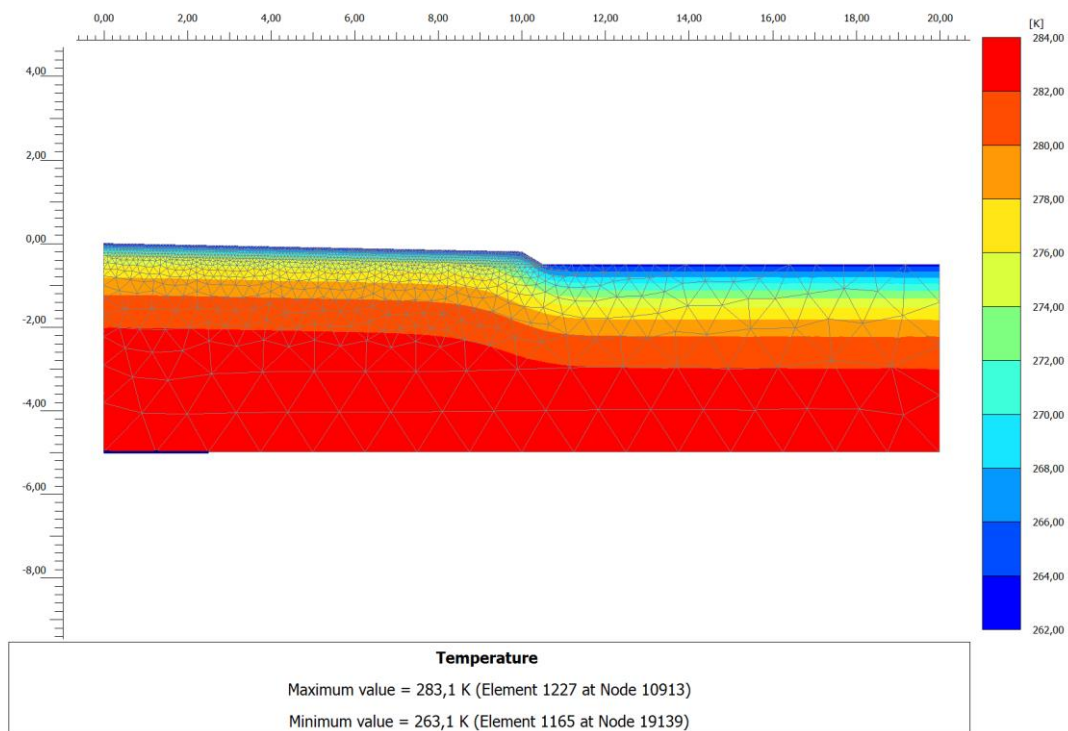
4. ábra: Végeselemes modell



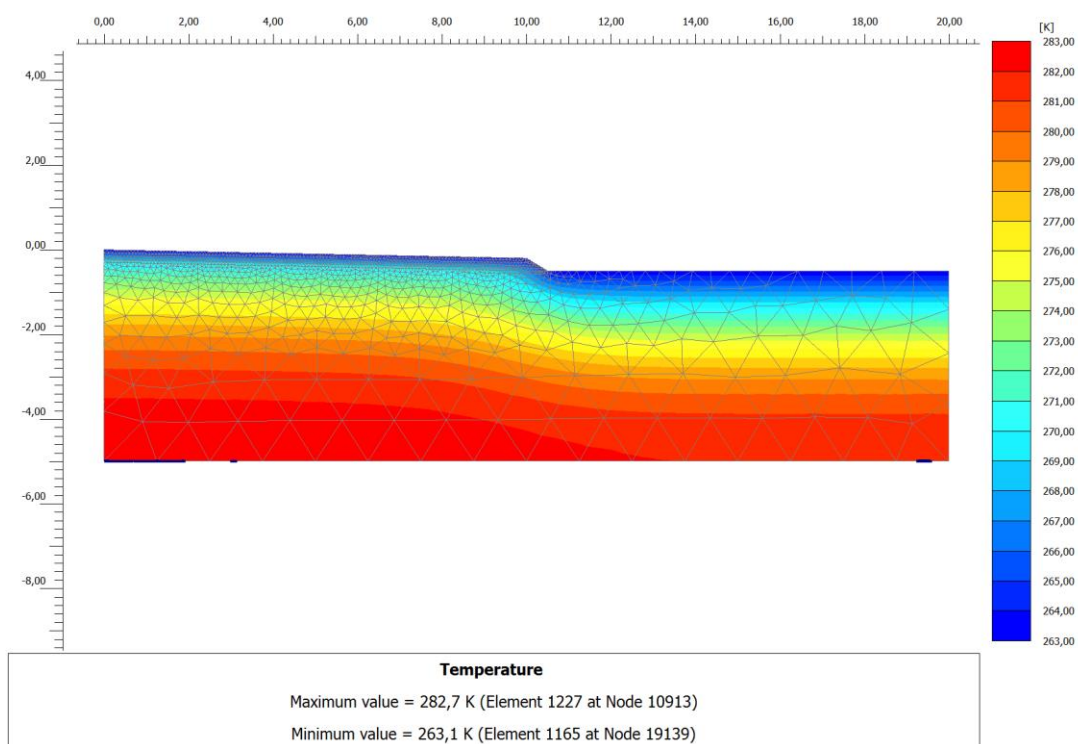
5. ábra: Hőmérséklet-eloszlás, $t=0$ nap, $T_{\text{levegő}} \approx 10$ °C



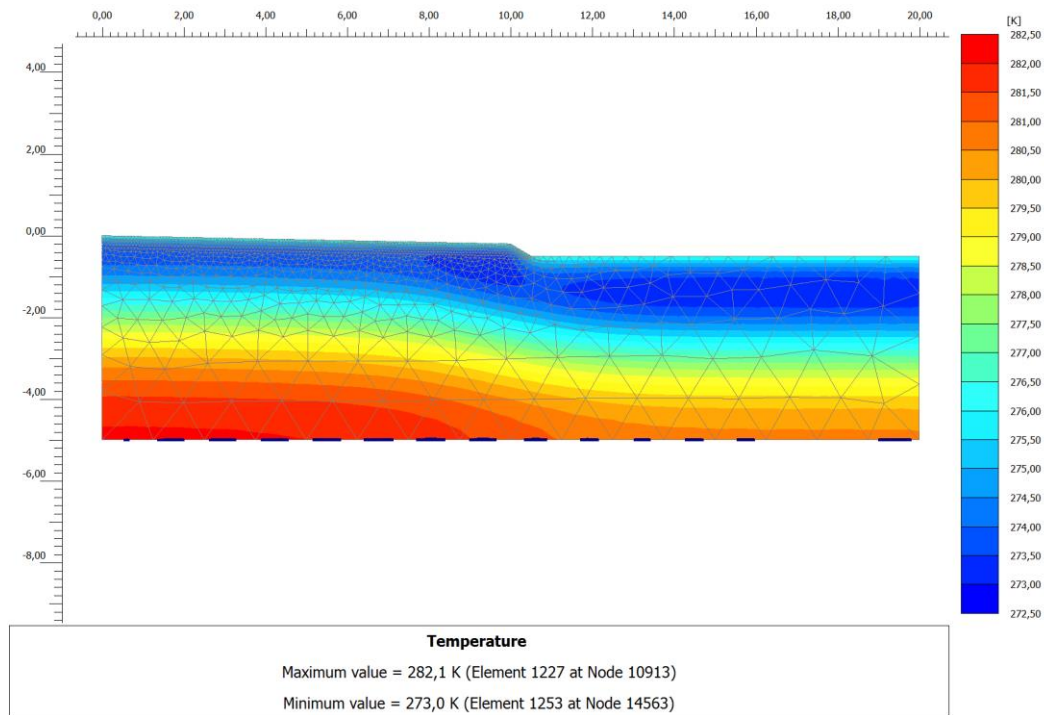
6. ábra: Hőmérséklet-eloszlás, $t=5$ nap, $T_{\text{levegő}} \approx 0$ °C



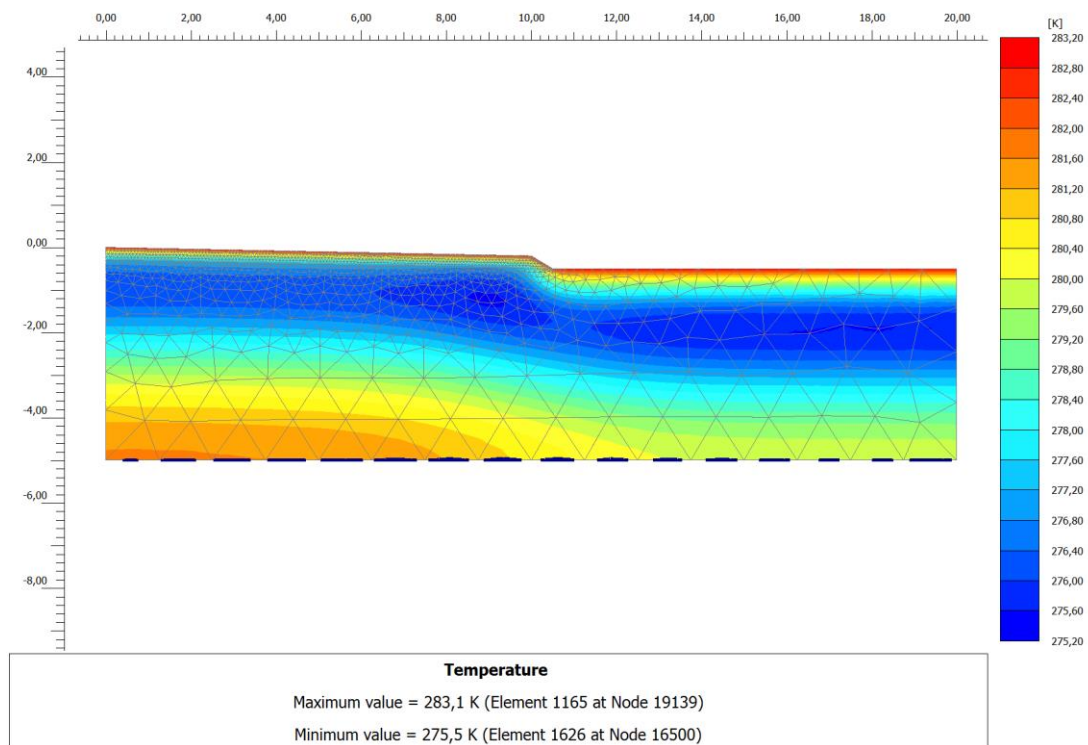
7. ábra: Hőmérséklet-eloszlás, $t=10$ nap, $T_{\text{levegő}} \approx -10$ °C



8. ábra: Hőmérséklet-eloszlás, $t=20$ nap, $T_{\text{levegő}} \approx -10$ °C



9. ábra: Hőmérséklet-eloszlás, $t=25$ nap, $T_{\text{levegő}} \approx 0$ °C



10. ábra: Hőmérséklet-eloszlás, $t=30$ nap, $T_{\text{levegő}} \approx 10$ °C

4. ÖSSZEGZÉS

A pályaszerkezet reziliens modulusának értékét a talaj állapotjellemzői jelentősen befolyásolják, melyek közül a víztartalom eloszlás és a hőmérséklet ingadozás (fagyás-olvadás ciklusok) a

leglényegesebbek. Ezek a folyamatok modellezhetőek illetve számíthatóak, azonban a számítások elvégzéséhez bemenő adatként szükséges talajjellemzők (telített áteresztőképesség, víztartási görbe stb.) meghatározása közvetlen méréssel költséges és időigényes. Természetesen a paraméterek tapasztalati képletek segítségével is becsülhetőek ez azonban a számítás megbízhatóságának csökkenésével jár. A cikkben különböző szintű eljárásokat mutattunk be, melynek segítségével akár egyszerű geotechnikai vizsgálatok (pl. talajazonosítás) eredményeiből is lehet következtetni a nehezebben meghatározható talajjellemzőkre (pl. víztartási görbe, áteresztőképesség stb.), és így definiálhatóak a klimatikus viszonyoktól függő reziliens modulus számításához szükséges bemenő paraméterek. A folytatásban az ismertetett talajparaméterek alkalmazásával bemutatjuk a reziliens modulus számításának módszerét és a módszer értékelését.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- Fredlund D. G., Rahardjo H., Fredlund M. D. (2012): *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons. 944 p. ISBN: 978-1-118-13359-0
- Fredlund D. G., Sheng D., Zhao J. (2011): Estimation of soil suction from the soil water characteristic curve. In: *Canadian Geotechnical Journal*. 48(2): p. 186-198.
- Fredlund D. G., Xing, A., Fredlund, M., Barbour, S. L. (1995): The Relationship of the Unsaturated Shear Strength to the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, p. 440-448.
- Leong E. C., Rahardjo H. (1996): "A Review on Soil-Water Characteristic Curve Equations", Geotechnical Research Report, NTU/GT/96-5, Nanyang Technological University, NTU PWD Geotechnical Research Center, Singapore
- Van Genuchten M. T. (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sc. Soc. Am J.*
- Witczak M. W., Houston W. N., Zapata C. E., Richter C., Larson G., Walsh K. (2000): Improvement of the Integrated Climatic Model for Moisture Content Predictions. Development of the 2002 Guide for the Development of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCH RP 1-37 A, Inter Team Technical Report (Seasonal 4), Tempe, AZ.
- Zapata C. E. (1999): Uncertainty in Soil-Water Characteristic Curve and Impacts on Unsaturated Shear Strength Predictions. Ph.D. Dissertation, 1999, Arizona State University, Tempe, AZ.
- Zapata C. E., Andrei D., Witczak M. W., Houston W. N. (2007) Incorporation of Environmental Effects in Pavement Design. *Road Materials and Pavement Design* Vol.8:4 pp. 667-693.
- Zapata C.E., Houston W.N., Houston S.L., Walsh K.D. (2000): Soil-Water Characteristic Curve Variability. *Advances in Unsaturated Geotechnics*, Shackelford C.D., Houston S.L., and Chang N-Y (eds). ASCE – GEO Institute Geotechnical Special Publication, No. 99. Also Proceedings Sessions Geo-Denver 2000, August 5-8, Denver, CO, p. 84-124.