

DIPLOMADOLGOZAT

Waltner Soma

2023



**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Műszaki Intézet
Gépészmérnök mesterképzési szak**

Növényház hőtechnikai részfolyamatainak elemzése

Belső konzulens:	Dr. Oldal István Egyetemi docens
Belső konzulens intézete/tanszéke:	Műszaki Intézet, Gépszerkeztani Tanszék
Külső konzulens:	Dr. Nagygál János Árpád Agrár Zrt, műszaki igazgató
Készítette:	Waltner Soma

**Gödöllő
2023**

MŰSZAKI INTÉZET
GÉPÉSZMÉRNÖK MESTERSZAK
Műszaki fejlesztő specializáció

DIPLOMADOLGOZAT

feladatlap

Waltner Soma (LEVIM1)

részére

A diplomadolgozat címe:

Növényház hőtechnikai részfolyamatainak elemzése

Feladatkiírás:

Végezze el a meghatározott növényházi környezetnek hőtechnikai részfolyamatainak elemzését, mely során alkalmazza az elfogadott analitikus módszereket, valamint végelelem technológiákat. A vizsgált környezet eredményeinek ismeretében hasonlítsa össze azokat a jelenleg alkalmazott módszerekkel, határozza meg annak alkalmazhatóságát.

Közreműködő tanszék: Gépszerkezettani tanszék

Külső konzulens: Dr. Nagygál János, műszaki igazgató, Árpád Agrár Zrt.

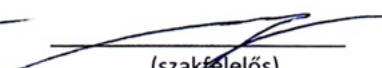
Belső konzulens: Dr. Oldal István, egyetemi docens, MATE, Műszaki Intézet

A dolgozat beadási határideje: 2023. év 11. hó 06. nap

Kelt: Gödöllő, 2023. év 06. hó 22. nap

Jóváhagyom


(tanszékvezető)

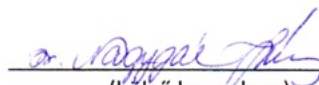

(szakfelelős)

Átvettem


(hallgató)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Kelt: Gödöllő, 2023. év 11. hó 03. nap


(külső konzulens)

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, működő megoldások és egyedi konstrukció bemutatása	5
1.1. Hűtés légmozgással	6
1.1.1. Természetes szellőztetés	7
1.1.2. Gépi szellőztetés	9
1.2. Evaporációs hűtés	11
1.3. „Pad & Fan” rendszer	13
1.4. Köd/pára rendszer	14
1.5. Tető párologtatós megoldás	16
1.6. Árnyékolás	17
1.7. Összefoglalás és saját megoldás	19
2. Saját környezet bemutatása	20
3. Célkitűzés	25
4. Esővíz tároló hőleadó képességének meghatározása analitikus módon	26
4.1. Peremfeltételek, és alkalmazott egyenletek	26
4.2. Python kód megalkotása	29
4.3. Eredmények	32
5. Üvegház lég- és hőáramlási vizsgálata VEM alapokon	36
5.1. Körülmények, alapbeállítások (MODELL)	37
5.2. Modell előkészítése	38
5.3. Vizsgálati struktúra	43
5.4. Eredmények	44
5.4.1. Eredmények 30 [°C] külső hőmérsékletű modellek esetében	44
5.4.2. Eredmények 35 [°C] külső hőmérsékletű modellek esetében	47
5.4.3. Eredmények 40 [°C] külső hőmérsékletű modellek esetében	49
5.5. VEM eredmények összegzése	52

6. Következtetések, javaslatok	55
7. Összefoglaló	56
8. Summary	57
9. Irodalomjegyzék.....	58
10. Ábra- és táblázat jegyzék	63
11. Nyilatkozatok	67
12. Mellékletek.....	69
12.1. Python kód az esővíztároló leadható hőteljesítményének vizsgálatához.	69
12.2. Az analitikus modellezés során számított és exportált egzakt adatok.	72
12.3. Megadott peremfeltételek a VEM modellben	73
12.4. Vizsgálati struktúra.....	76
12.5. VEM számított eredmények.....	78
12.6. VEM diagramok.....	80
12.6.1. 30 [°C] külső hőmérséklet esetén.....	80
12.6.2. 35 [°C] külső hőmérséklet esetén.....	83
12.6.3. 40 [°C] külső hőmérséklet esetén.....	86

1. Bevezetés, működő megoldások és egyedi konstrukció bemutatása

Az üvegházakban történő növénytermesztés során a fűtés általános megoldás, azonban a klímaváltozás miatt várhatóan emelkedő hőmérsékletek és hektikus időjárási viszonyok okán Barthory és munkatársai (2007), valamint Faragó és munkatársai (2010) alapján az üvegházak hűtése is létfontosságú feladat lesz a megfelelő környezeti feltételek fenntartása és a növények optimális növekedési körülményeinek biztosítása szempontjából. A hűtési rendszerek számos fontos funkciót látnak el, melyeket az alábbiakban foglalom össze:

- **Hőmérséklet szabályozás:** Az üvegházak hűtése lehetővé teszi a bennük uralkodó hőmérséklet szabályozását. A növények számára optimális hőmérsékleti tartomány fenntartása kulcsfontosságú a megfelelő növekedés és fejlődés érdekében. Túl magas hőmérséklet esetén a növények stressznek vannak kitéve, ami Wahid és munkatársai (2007) szerint csökkentheti a termés mennyiségét és minőségét egyaránt.
- **Páratartalom szabályozás:** Az üvegházakban a hűtés segít a páratartalom szabályozásában. A magas páratartalom kedvező környezetet teremt a gombafertőzések kialakulásához és a növények betegségeihez. A megfelelő hűtés csökkentheti a páratartalmat, így minimalizálva a betegségek kockázatát. Természetesen ez a tulajdonság a hűtés módja alapján mérséklődhet.
- **Fényintenzitás kontroll:** Az üvegházak hűtése lehetővé teszi a belső fényviszonyok irányítását. A túl magas hőmérséklet és intenzív napsugárzás esetén a növények stresszesek lehetnek, és a fotoszintézis hatékonysága csökkenhet. Bizonyos hűtési megoldású hűtés segít fenntartani a megfelelő fényintenzitást a növények számára.
- **Vízgazdálkodás:** A hűtésnek fontos szerepe van a vízgazdálkodásban is. Az üvegházakban a hőmérséklet emelkedésével a növények vízigénye is nő O'Connor és Mehta (2016) szerint. A hűtés révén lehetőség van a vízvesztesség csökkentésére, miközben megfelelő öntözés biztosítja a növények vízellátását.
- **Terméshozam és minőség növelése:** Az optimális környezeti feltételek fenntartása a növények egészséges növekedését és fejlődését eredményezi. Ez növelheti a terméshozamot és javíthatja a termés minőségét, ami kereskedelmi szempontból is fontos Yield gap... kiadás szerint (2015).

- **Éghajlatváltozás hatásainak kezelése:** Az éghajlatváltozás hatásai miatt az időjárási szélsőségek és a hőhullámok gyakoribbá válhatnak. Az üvegházak hűtése segít enyhíteni ezeket a hatásokat, biztosítva a stabil növénytermelést az egyre változó környezeti körülmények között.

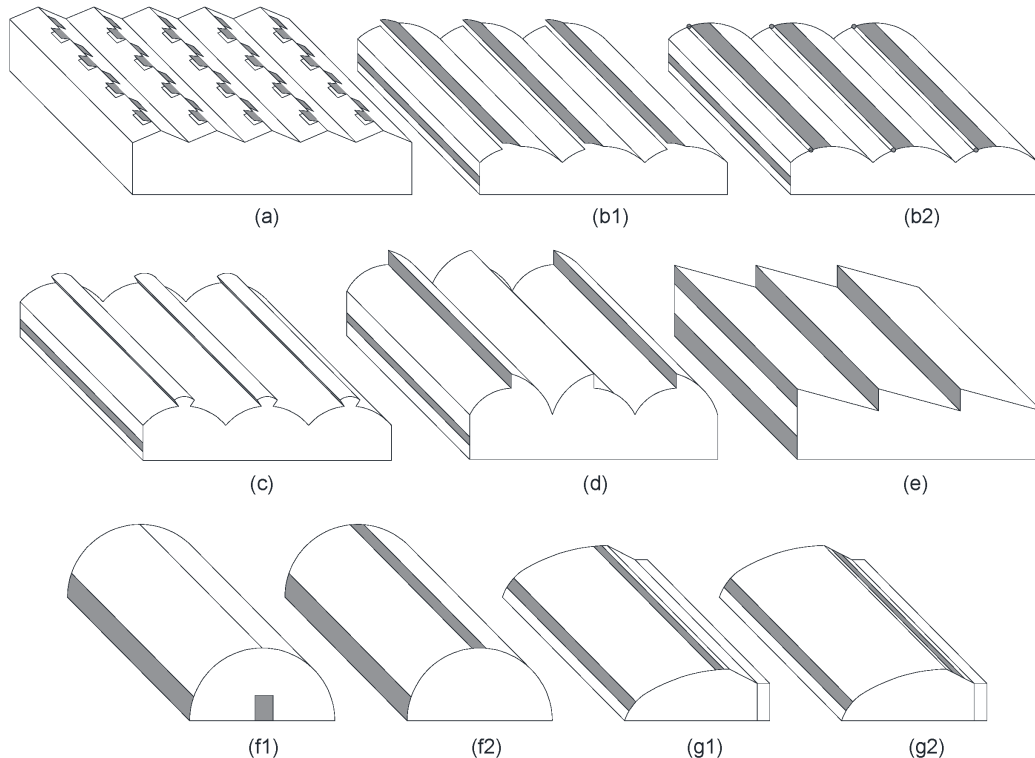
Az üvegházak hűtése tehát idővel elengedhetetlen eleme lesz a sikeres növénytermesztéshez, a termés hozam optimalizálásához és a fenntartható agrárgazdálkodáshoz. A modern üvegháztechnológiák fejlődése lehetővé teszi hatékony hűtési rendszerek alkalmazását, amelyek optimalizálják a növények környezeti feltételeit a legjobb eredmények eléréséhez. A további alfejezetekben a ma használt technológiákat mutatom be.

1.1.Hűtés légmozgással

Az üvegházak jellegükből adódóan a nap energiájának hasznosításának növelésére szolgálnak. Ennek következménye, hogy a belső térben a külső viszonyokhoz képest magasabb hőmérséklet érhető el. Ez azt jelenti jelen esetben, hogy a legegyszerűbb megoldás a légtér hűtésére ennek a hatásnak a csökkentése természetes légmozgás, vagy gépi szellőztetés biztosításával, így a külső alacsonyabb hőmérséklet áramlik az üvegház légterébe.

1.1.1. Természetes szellőztetés

Az üvegházak természetes szellőztetése egy bevált módszer a növények optimális növekedési környezetének fenntartására és a hőszabályozásra. A természetes szellőztetés az olyan környezeti tényezőket használja fel, mint a szél és a hőmérséklet különbségekből adódó lokális nyomáskülönbségek okozta légmozgások, hogy friss levegőt juttasson az üvegházba, és elvezesse a meleg levegőt. Az alábbiakban részletesebben bemutatom ennek a hűtési megoldásnak a működését és előnyeit. Az 1.1. ábrán láthatóak a jellemző kialakítások.



1.1. ábra: Jellemző természetes szellőztetési kialakítások növényházak esetén.

[Zhang és munkatársai (2022)]

A természetes szellőztetés egyik alapelve az, a meleg légtömegek emelkedése. Amikor a napsugárzás hatására a levegő felmelegszik az üvegházban, könnyebbé válik, így felfelé áramlik. Az üvegház tetején jellemzően ablakok vagy szellőzőnyílások találhatók, amelyeken keresztül a meleg levegő elhagyhatja az üvegházat. Eközben az alsóbb rétegekben lévő hűvösebb levegő beáramlik a padló vagy az oldalfalak irányából. Ez a természetes légáramlás lehetővé teszi az üvegházban levő hőmérséklet szabályozását.

Az üvegházban levő növények számára a természetes szellőztetés főbb előnyei:

- **Friss levegőellátás:** Az új levegő bejutása az üvegházba széndioxidot szállít a növényeknek, és elszállítja a oxigént, amit a növények a fotoszintézis során termeltek.
- **Hőszabályozás:** A természetes szellőztetés segít megelőzni a hősokkot. A forró levegő kijut az üvegházból, csökkentve ezzel a növények hőterhelését.
- **Páratartalom szabályozás:** A természetes szellőztetés révén a pára is távozik az üvegházból, ami segít a páratartalom szabályozásában. A növények gombás megbetegedéseit hátráltathatjuk ilyen módon.
- **Energiahatékonyság:** Jelen vizsgálat egyik szempontja ez, és a természetes szellőztetés energiatakarékos megoldás, mivel nincs szükség ventilátorokra vagy más gépi berendezésekre, eltekintve az esetleges ablakmozgató berendezésektől.
- **Természetes rovarmenedzsment elősegítése:** A természetes szellőztetés a rovarmenedzsmentet segíti elő, mivel ebben a megoldásban a káros rovaroknak meg tud jelenni a természetes ellensége, így a hasznos rovarokra is veszélyes rovarölő szerekre kevésbé szükséges támaszkodni Bessin és munkatársai szerint (S.a).

A fentiek felül azonban fontos figyelembe venni, hogy a természetes szellőztetés hatékonysága korlátozott lehet olyan időszakokban, amikor a környezeti körülmények nem teszik lehetővé a szellőzést, például túl nagy, vagy alacsony szélsősebesség esetén. Emellett a nagyobb kiterjedésű üvegházak esetén a kiépítés is problémás lehet.

Az üvegházakban a természetes szellőztetés egy fontos eszköze a klíma szabályozásának és a fenntartható növénytermesztésnek. A megfelelő tervezés és működtetés segíthet maximalizálni ezen hűtési megoldás előnyeit és csökkenteni a környezeti hatásokat. Az üvegházgazdálkodás során a természetes szellőztetés fontos szerepet játszik a növények egészségének és termés hozamának optimalizálásában.

1.1.2. Gépi szellőztetés

Az üvegházakban alkalmazott gépi szellőztetési rendszerek kritikus szerepet játszanak a növények növekedésének és termésének maximalizálásában. A következőkben részletesen bemutatom a gépi szellőztetés hűtési megoldásait és azok fontos szerepét az üvegházgazdálkodásban. Az 1.2. ábrán egy jellemző gép szellőztetés megoldás látható.



1.2. ábra: Jellemző gépi szellőztetés kialakítás [Greenhouse ventilation (S.a.)].

A gépi szellőztetés jellemzőit a következő listában foglalom össze:

- **Hőszabályozás:** A gépi szellőztetés lehetővé teszi a hőmérséklet szabályozását azáltal, hogy hűtőventilátorokat használ a forró levegő kiszellőztetésére. Ezáltal minimalizálható a hőstressz hatása, amely negatívan befolyásolhatja a termés hozamot és a növények egészségét. A pontos szabályozásnak köszönhetően az üvegházak szélsőséges hőmérsékleti ingadozások nélkül képesek a növények optimális növekedési hőmérsékletét biztosítani Wahid és munkatársai (2007) alapján.
- **CO₂ koncentráció szabályozás:** A CO₂ a fotoszintézis alapvető összetevője. A növények növekedése és termés hozama jelentősen javulhat a megfelelő CO₂ szint mellett. Az optimális CO₂ szint segíti a növényeket a tápanyagok hatékony felhasználásában és a gyorsabb növekedésben Fleisher és munkatársai (S.a.) szerint.

- **Betegségek és kártevők elleni védelem:** Az üvegházakban a növények hajlamosak a betegségekre és kártevőkre. A gépi szellőztetés lehetővé teszi a levegő tisztítását szűrők és szűrőrendszerek használatával. Az ilyen rendszerek szűrik a levegőt, távol tartva a kártevőket és a betegségeket. Ezenkívül az automatikus szellőztető rendszerek a megfelelő időben történő légcseré biztosításával minimalizálják a betegségek terjedését.
- **Időjárásfüggőség:** A gépi szellőztetés lehetőséget nyújt az időjárás függő szabályozásra. A szenzorok és automatikus vezérlőrendszerek lehetővé teszik az üvegházak számára, hogy reagáljanak a környezeti tényezők változásaira. Például a hirtelen hőhullám esetén a gépi szellőztetés növelheti a ventilátorok sebességét, hogy a hőmérsékletet szabályozza, és minimalizálja a hőstressz hatásait.
- **Kontroll és monitorozás:** A gépi szellőztetés lehetővé teszi a folyamatos ellenőrzést és monitorozást. A szenzorok és automatizált vezérlőrendszerek folyamatosan figyelemmel kísérik a hőmérsékletet, páratartalmat, CO₂ szintet és egyéb környezeti paramétereket. Ez lehetővé teszi a termesztők számára, hogy a növények számára optimális környezetet biztosítsanak, valamint automatikusan és gyorsan reagáljanak a külső paraméterek változására.

Összességében a gépi szellőztetés rendszerek integrált megközelítést kínálnak az üvegházgazdálkodásban. Az ilyen rendszerek lehetővé teszik a növények számára ideális környezet biztosítását, növelve a terméshozamot, javítva a termékek minőségét és csökkentve a termesztés kockázatait. Az üvegházgazdálkodásban az ilyen szellőztetési megoldások elengedhetetlenek a hatékony és fenntartható növénytermesztéshez.

1.2. Evaporációs hűtés

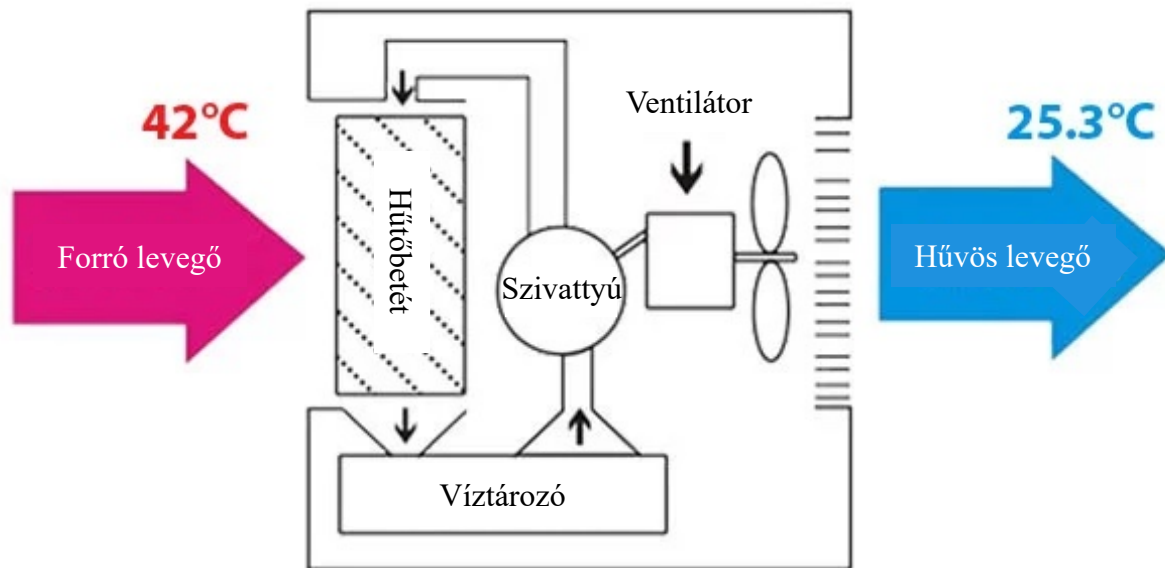
Az evaporációs hűtés egy hatékony módszer, amely lehetővé teszi a hőmérséklet és a páratartalom szabályozását. Az alábbiakban részletesen bemutatom az üvegházakban alkalmazott evaporációs hűtés rendszereket, azok működését és előnyeit Youssef és munkatársai (2015) alapján.

Az evaporációs hűtés azon az elven alapul, hogy a víz elpárologtatása energiát igényel, amely hőt von el a környezetből. Az üvegházakban ez a rendszer a vízpárologtatás folyamatán keresztül hűti le a levegőt, minimalizálva a hőmérsékletet.

A rendszer a következő elemekből áll:

- **Párologtatási rendszer:** Az evaporációs hűtés első lépése egy párologtatási rendszer beépítése az üvegházba. Ez a rendszer általában tartalmazza a permetezőrendszert vagy a csepegtetőrendszert, amely lehetővé teszi a víz permetezését a növények és a környező levegő fölött.
- **Vízforrás:** Az evaporációs rendszerhez szükség van egy megbízható vízforrásra, amely biztosítja a folyamatos vízellátást. Ez lehetővé teszi a permetezőrendszerek működését és a víz folyamatos párologtatását.
- **Széllel való kölcsönhatás:** A hűtés hatékonysága a levegő mozgásával is összefügg. A szél segít a víz párologtatásának gyorsabb eloszlásában és a hőmérséklet csökkentésében. Ezért a szellőzőrendszerek és ventilátorok is fontosak az evaporációs hűtés hatékony működéséhez, azonban egységes légáramot kell biztosítani a megfelelő működés érdekében.
- **Páratartalom figyelemmel kísérése:** Az evaporációs hűtés során fontos figyelemmel kísérni a páratartalmat az üvegházban. A túlzott páratartalom negatívan befolyásolhatja a növényeket és a terméshozamot, valamint betegségek megjelenését is eredményezheti a növénykultúra esetében. Ezért szükség van egy megbízható páratartalom-monitorozó rendszerre, amely lehetővé teszi a páratartalom optimális szinten tartását.

A rendszer működési sémáját az 1.3. ábra mutatja be.



1.3. ábra: Az evaporatív hűtés működése

[Why evaporative air cooling system cikk (S.a) alapján, magyarra fordítva]

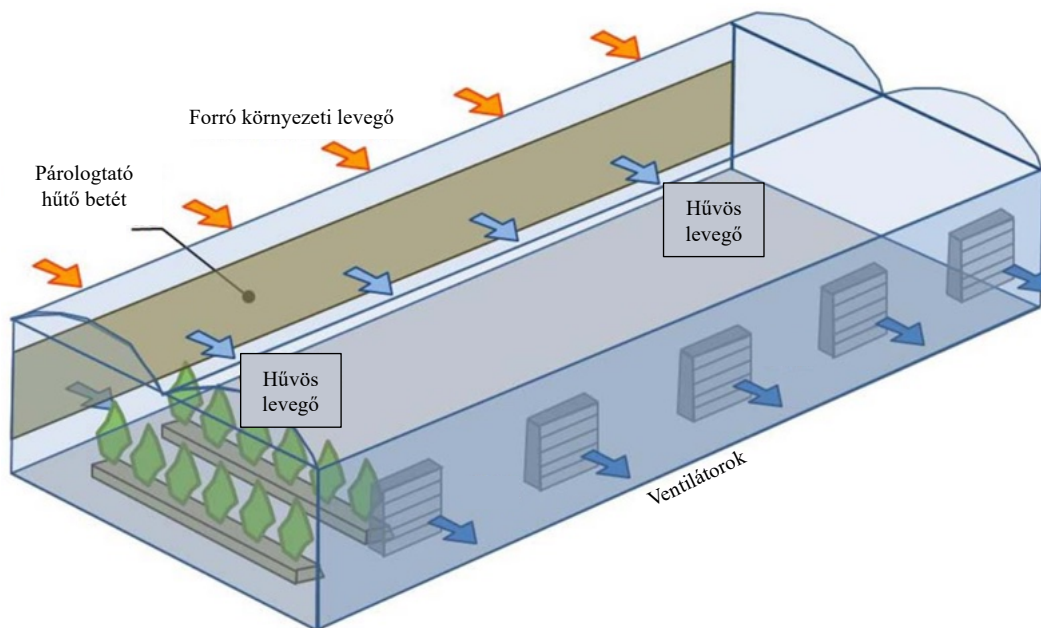
Az evaporációs hűtés elemzése:

- **Hőmérséklet csökkentése:** Az evaporációs hűtés hatékonyan csökkenti a hőmérsékletet az üvegházban.
- **Páratartalom szabályozása:** Az evaporációs hűtés rendszer lehetővé teszi a páratartalom szabályozását az üvegházban. A megfelelő páratartalom kulcsfontosságú a növények számára, és az evaporációs hűtés segít minimalizálni a túlzott szárazság hatásait.
- **Növény vitalitás:** A hűtés és a páratartalom szabályozás révén az evaporációs hűtés hozzájárulhat a növények egészségének javításához és a betegségek terjedésének minimalizálásához.
- **Energiahatékonyság:** Az evaporációs hűtés rendszerek energiahatékonyak, mivel az elpárologtatás folyamata alacsony energiaigényű. Ez csökkenti az üvegház működtetési költségeit.

Az evaporációs hűtés rendszerek hatékony módszert kínálnak az üvegházakban történő hőmérséklet- és páratartalom-szabályozáshoz. A növények optimális körülményeinek biztosításával hozzájárulnak a terméshozam növeléséhez és a növények egészségének javításához. Az üvegházak gazdálkodói számára az evaporációs hűtés rendszerek kulcsfontosságúak a hatékony növénytermesztés és a fenntarthatóság eléréséhez.

1.3. „Pad & Fan” rendszer

Az alábbiakban részletesen bemutatom a pad and fan rendszereket, működésüket és előnyeiket az üvegházakban történő alkalmazás során Bucklin és munkatársai (1993) szerint. A jellemző kialakítást az 1.4. ábra szemlélteti.



1.4. ábra: Jellemző pad and fan hűtési rendszer kialakítás
[Franco és munkatársai (2014) alapján, magyarra fordítva].

A pad and fan rendszer alapvetően két fő elemet foglal magában:

- **Pad (párna/betét) rendszer:** Az üvegház egyik oldalára elhelyezett párnarendszer olyan párnákat/betéteket tartalmaz, amelyek vízzel vannak átitatva. A levegő a párnákon keresztül áramlik, és a víz párologtatás során elvonja a hőt, ezáltal csökkenti a hőmérsékletet.
- **Ventilátorok:** A rendszer másik része a ventilátorokból áll, amelyek a meghűtött levegőt a padokon keresztül áramoltatják az üvegházba. A ventilátorok állandó levegőmozgást biztosítanak, ami segít a hőmérséklet egyenletes szabályozásában.

A pad and fan rendszerek működési elve az evapotranspiráció és a légáramlás kombinációján alapul. Az elpárolgatatott víz a párnákból hűti a levegőt, miközben a ventilátorok biztosítják a friss levegő áramlását. Ez a folyamat hatékonyan csökkenti a hőmérsékletet az üvegházban.

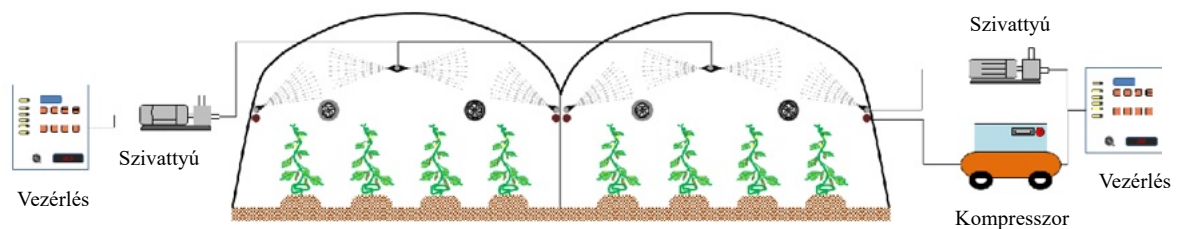
A pad and fan rendszer alkalmazásának előnyei:

- **Páratartalom-szabályozás:** A pad and fan rendszerek segítenek a páratartalom szabályozásában is, minimalizálva a túlzott páratartalom hatásait, amelyek rothadáshoz és betegségek kialakulásához vezethetnek.
- **Optimális növekedési körülmények:** Az egyenletes levegőáramlás és hőmérséklet-szabályozás révén a növények optimális növekedési körülmények között fejlődhetnek. A ventilátorok segítségével egyenletes levegő paramétereket hozhatunk létre nagyobb kiterjedésű üvegház rendszerek esetén is.
- **Betegségmegelőzés:** A páratartalom szabályozás és az optimális hőmérséklet minimalizálja a betegségek és rothadás kialakulásának kockázatát a növények között.

A pad and fan rendszerek kiemelkedően hatékonyak az üvegházakban történő növénytermesztés során, különösen olyan körülmények között, ahol a hőmérséklet és a páratartalom szabályozása kulcsfontosságú.

1.4. Köd/pára rendszer

Az üvegházakban alkalmazott köd/pára rendszer egy hatékony és korszerű megoldás a hőmérséklet szabályozására és a növények megfelelő növekedési körülményeinek fenntartására. Az 1.5. ábrán a jellemző rendszerkialakítás látható.



1.5. ábra: Jellemző köd/pára rendszer kialakítás

[Park és munkatársai (2020) alapján, magyarra fordítva]

A rendszer működési elve és jellemzői a következők Eddris és munkatársai (2019) alapján:

- **Páramennyiség növelése:** A köd- és pára-rendszer előállítja a finom vízcseppeket vagy párákat, amelyeket az üvegházba juttat. Ezek a cseppek és a pára növelik a levegő páratartalmát, amely a fizikai folyamatok lejátszódása során hűtő hatást eredményez.

- **Hőelvonás:** Az elpárologtatott víz energiát von el a környező levegőből a hőszükséglet kielégítése érdekében. Ezáltal csökken a levegő hőmérséklete, és a növényeknek ideálisabb körülményeket teremt.
- **Páratartalom szabályozás:** A köd/pára-rendszer lehetővé teszi a páratartalom szabályozását az üvegházban. Ennek eredményeként minimalizálja a túlzott páratartalom hatásait, amelyek a rothadás és a betegségek kialakulásához vezethetnek.
- **Kontroll és automatizálás:** A modern köd- és pára-rendszerek számos automatizálási és szabályozási lehetőséget kínálnak, amelyek lehetővé teszik az üvegházak teljeskörű ellenőrzését. Például hőmérséklet-, páratartalom- és időzítő beállításokat, vagy lokális szabályozást.
- **Lokális vezérlés:** A köd- és pára-rendszer lehetővé teszi a hűtést a növények közvetlen közelében, ami különösen hasznos lehet abban az esetben, ha az adott üvegházban több növénykultúra is található.

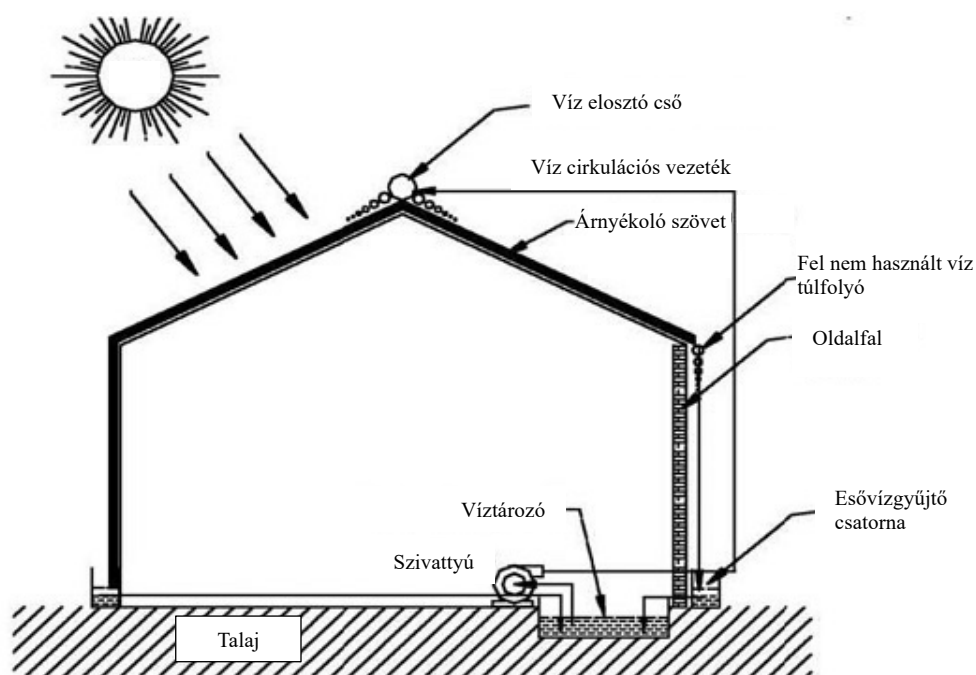
A köd- és pára-rendszer hatékonysága és hatásossága jelentősen függ, a megfelelő tervezéstől és karbantartástól. Az üvegházak gépi rendszerei gyakran számítógépes vezérléssel és érzékelőkkel vannak felszerelve, amelyek lehetővé teszik a folyamatos ellenőrzést és szabályozást. A rendszer időzítése és beállításai az adott növények igényeinek megfelelően állíthatók be.

Az üvegházakban alkalmazott köd- és pára-rendszerek egyértelműen hozzájárulnak a modern mezőgazdaság és kertészet fejlődéséhez, és lehetővé teszik a terméshozam növelését és a növények egészségi állapotának javítását. Az üvegházak hatékony hűtési rendszereként elterjedten alkalmazzák, és a jövőben továbbfejlesztve ismét új lehetőségeket kínálhatnak a mezőgazdaság területén.

1.5. Tető párologtatás megoldás

A rendszer működési elve és jellemzőit Li és Wang (2015) munkája alapján foglalom össze:

A tető párologtatásos hűtése egy olyan rendszer, ahol a hűtést úgy érik el, hogy vizet permeteznek az üvegház tetejére. A víz elpárolog, hőt vesz fel a tetőről, és lehűti a tetőfelületet. Itt a tetőhűtés független az üvegház belső páratartalmától, a belső levegő pedig a hidegebb tető következtében lehűl. A vízréteg jelenléte a tető felületén szintén csökkenti a felület napsugárzási áteresztőképességét, ezzel is csökkentve a belső hőmérsékletet. A tetőhűtés belső párással kombinálható a jobb eredmény érdekében. A külső nedves árnyékolókendők az 1.6. ábrán a párologtatós rendszerrel kombinálva láthatók.



1.6. ábra: Külső nedves árnyékolókendők a tető párologtatós rendszerrel kombinálva.

[Gosh (2019) alapján, magyarra fordítva]

Gyakorlatban vizsgálták Li és Wang (2015) alapján az üvegházak hűtési hatékonyságát a külső tető és a belső termőtalaj nedvesítésével, ahol a paradicsom növénykultúra mellett. Beszámoltak arról, hogy a tető nedvesítése kisebb hatással volt a levegő és a lombkorona hőmérsékletének csökkentésére, mint a belső párologtatás. A két nedvesítő megoldás kombinációja mellett arra a következtetésre jutottak, hogy a belső léghőmérséklet 4-5 [°C]-kal alacsonyabb volt, mint a kontroll üvegházban, azonban ha az üvegháztetőn vízfóliával ellátott árnyékolókendőt használtak, a belső levegő hőmérséklete 10 [°C]-al emelkedett. Egyéb kísérletet végeztek a víz időszakos felhordásával az üvegházon kívülre szerelt árnyékhálóra. Az

eredmények azt mutatták, hogy az üvegházi levegő hőmérsékletének emelkedése csúcsidőszakban 41[%]-kal csökkent nedves árnyékoló alatt, szemben a száraz árnyékoló esetében, mikor 18[%]-kal.

A tető párologtatós rendszer előnyei közé tartozik az egyszerű telepítés.

1.6. Árnyékolás

Az üvegházak árnyékoló rendszerei fontos eszközök a növénytermesztésben, különösen olyan régiókban, ahol a nyári hőmérséklet magasabb lehet, és a növényeknek hűvösebb környezetre van szükségük. Az árnyékolók célja, hogy csökkentsék az üvegház belsejében uralkodó hőmérsékletet, ezáltal lehetővé téve a növények számára a megfelelő körülmények közötti növekedést. Az árnyékoló rendszerek különböző formában és méretben alkalmazhatók, és számos előnyt kínálnak a hőmérséklet szabályozása és az energiamegtakarítás terén.

Az üvegházak árnyékoló rendszereinek főbb tulajdonságai Holcman, Sentelhas (2012) és Ahemd (2016) alapján:

- **Napfény szabályozása:** Az árnyékolók képesek szabályozni a napfény beáramlását az üvegházba. A növények számára túlzott napsugárzás káros lehet, és a levelek akár égési jeleket is mutathatnak. Az árnyékolók lehetővé teszik a fény intenzitásának csökkentését, miközben még mindig elegendő fényt biztosítanak a fotoszintézishez.
- **Hőmérsékletcsökkentés:** Az árnyékoló rendszerek csökkenthetik az üvegház belsejében uralkodó hőmérsékletet. A felhőréteghez hasonlóan az árnyékoló anyagok visszaverik a nap energiáját, csökkentve ezzel a hőbevitelt. Ez különösen fontos a nyári hónapokban, amikor a hőmérséklet gyorsan emelkedhet, és hőstressz alakulhat ki a növényeknél.
- **Energiamegtakarítás:** Az árnyékoló rendszerek hatékonyan csökkenthetik a hűtési költségeket. A hőmérséklet csökkentése az üvegházban lehetővé teszi a ventilátorok vagy egyéb gépek alacsonyabb teljesítményen való működését, ezáltal csökken az energiafogyasztás és a költségek.
- **Hőmérséklet és páratartalom szabályozása:** Az árnyékolók hozzájárulnak a hőmérséklet és a páratartalom ideális szinten tartásához. A megfelelő páratartalom és hőmérséklet kulcsfontosságú a növények számára, és az árnyékoló rendszerek segítenek ezen paraméterek ellenőrzésében.

- **Védőréteg képzése:** Az árnyékoló anyagok védőréteget képeznek az üvegház tetején vagy oldalán. Ez a réteg véd a túlzott napsugárzás és az időjárási hatások ellen, amelyek hosszú távon károsíthatják az üvegház szerkezetét.
- **Napenergia szabályozás:** Az árnyékolók használata lehetővé teszi a napenergia mennyiségének szabályozását. Az üvegházban lévő növényeknek különböző igényeik lehetnek a napfényre, és az árnyékoló rendszerek segítenek ezeknek az igényeknek a kielégítésében.
- **Éghajlati alkalmazkodás:** Az árnyékolók alkalmazása lehetővé teszi az üvegházak alkalmazkodását a különböző éghajlati viszonyokhoz. A változó időjárási körülmények között az árnyékolók segíthetnek fenntartani a stabil növényi környezetet.

Az 1.7. ábrán látható egy üvegházi árnyékoló megoldás.



1.7. ábra: Üvegházi árnyékolás a gyakorlatban [Shade (S.a)]

Az árnyékoló rendszerek különböző formában alkalmazhatók az üvegházakban. A leggyakoribb típusok közé tartoznak a kézi vagy motorizált árnyékolók, a függönyök és a speciális árnyékoló anyagok. A megfelelő árnyékoló rendszer kiválasztása függ az üvegház méretétől, a növényfajtáktól és az éghajlati viszonyoktól. Az árnyékoló rendszerek hatékonyan hozzájárulnak a növények egészséges növekedéséhez és a terméshozam növeléséhez az üvegházakban.

1.7. Összefoglalás és saját megoldás

A korábbi megoldásokat áttekintve egy kisebb összefoglaló táblázatot hoztam létre. Ez az 1.1. táblázaton látható. Ebben a kialakítási, valamint karbantartási költségek nem szerepelnek, csupán működési paramétereket vettem figyelembe. Részletesebb elemzés esetén a fent említett tulajdonságokat is fontos vizsgálni.

1.1. táblázat: Meglévő megoldások és jellemző paramétereik [saját munka]

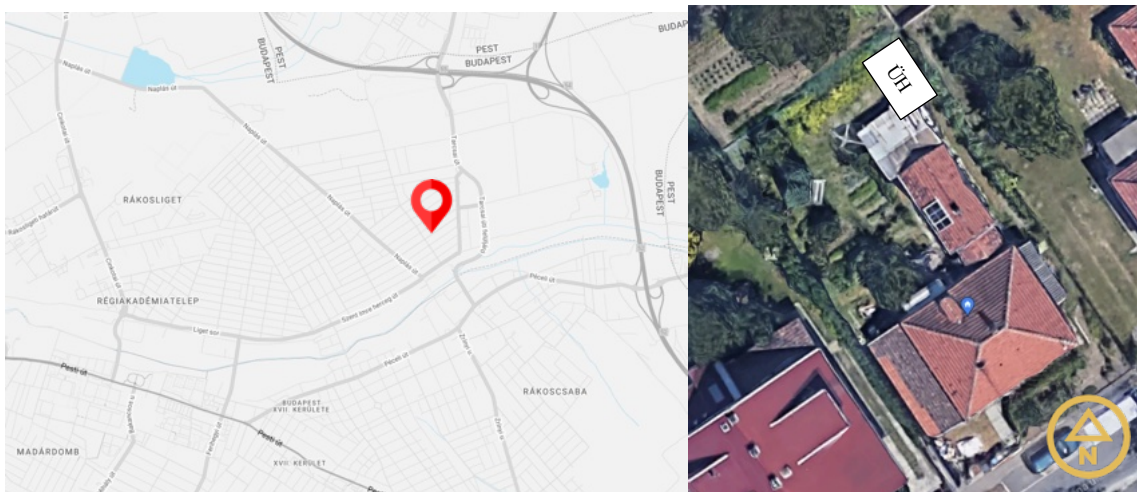
Hűtési megoldás	Működtetési energia	Vízfogyasztás	Hatékonyság
Szellőzés	Elhanyagolható	Nincs	Alacsony
Szellőztetés	Közepes	Nincs	Közepes
Evaporációs hűtés	Jelentős	Jelentős	Magas
Pad and Fan hűtés	Jelentős	Közepes	Magas
Köd/Pára rendszer	Jelentős	Jelentős	Magas
Tetőn párologtatás	Közepes	Jelentős	Alacsony
Árnyékolás	Elhanyagolható	Nincs	Alacsony

A fenti megoldásokon felül a saját megoldásom egy esővíztárolóval kombinált hűtési megoldás, amely az esővíztárolóban nyeletné el a felesleges hőmennyiséget közvetve, vagy közvetlenül. Működtetési energiája a keringtető szivattyúk miatt közepes lenne, Vízfogyasztással nem számolhatunk, mivel zárt rendszerről van szó. Hatékonyságát a szellőztetésnél egy kicsit jobbnak gondolom, mivel lokálisan a növények bizonyos részeinek hűtésére kerülne sor. Kultúrától függően gyökér- vagy lombhűtés is kialakítható lenne. Adott esetben akár a meglévő fűtőrendszer bizonyos elemei is felhasználhatók a rendszer kiépítése során.

A gyakorlatban a megoldás alkalmazására nem találtam példát, így kidolgozása nóvum, így az alkalmazhatóságának megvizsgálása indokolt. A további fejezetekben ennek a feladatnak az első lépéseit teszem meg.

2. Saját környezet bemutatása

A projekt létrehozásához a helyszín Budapest XVII. kerületének Rákoscaba-Újtelep része. A helyszín, valamint a növényház tervezett telken belüli elhelyezkedése, valamint a tájolás a 2.1. ábrán látható.

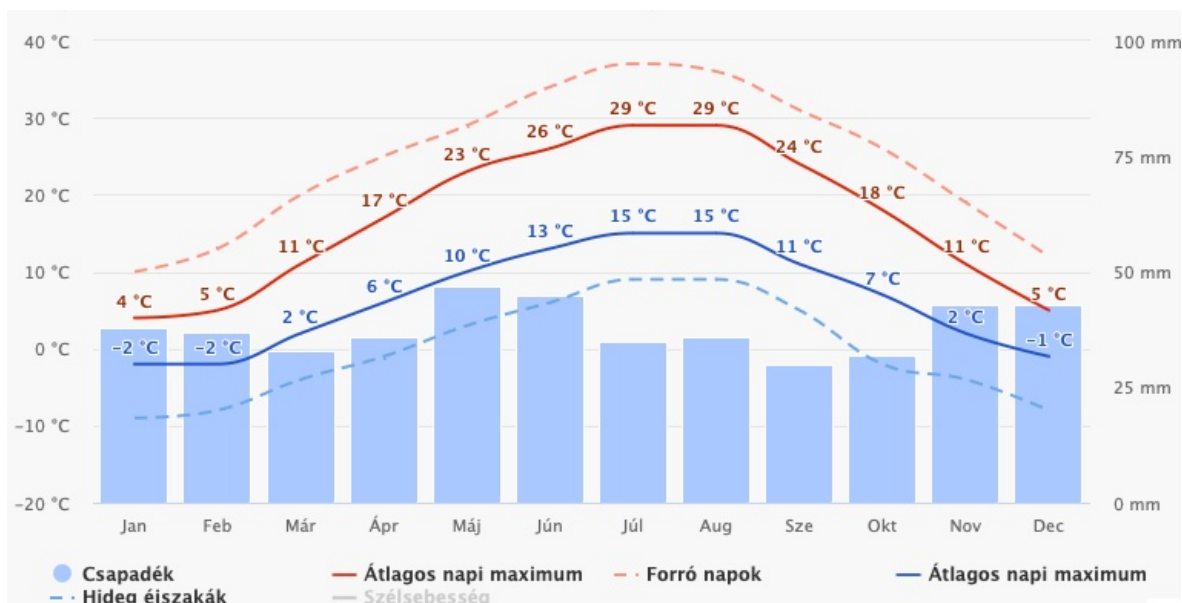


2.1. ábra: A tervezett helyszín (1172, Budapest) , valamint a telken belüli elhelyezkedés.

[saját munka]

A tervezett helyszín környezeti vizsgálatához meteorológiai, valamint talajtani adatokat gyűjtöttem be. A terület talaját az MBFSZ online térkép adatbázisa alapján, valamint helyszíni vizsgálatok alapján végeztem. A talajt tekintve a Rákos- és Szilas-patak között jellemző Folyóvízi-eolikus homok (fe-Qp3-hh) az uralkodó felszín képző. A mikrokörnyezetet tekintve a közelben vízfolyás van, amely alapján a mértékadó talajvízszint hozzávetőlegesen a felszín magasságában adható meg 148,2 [mBf], de a vizsgált mélységben állandó nedves talajjal lehet számolni.

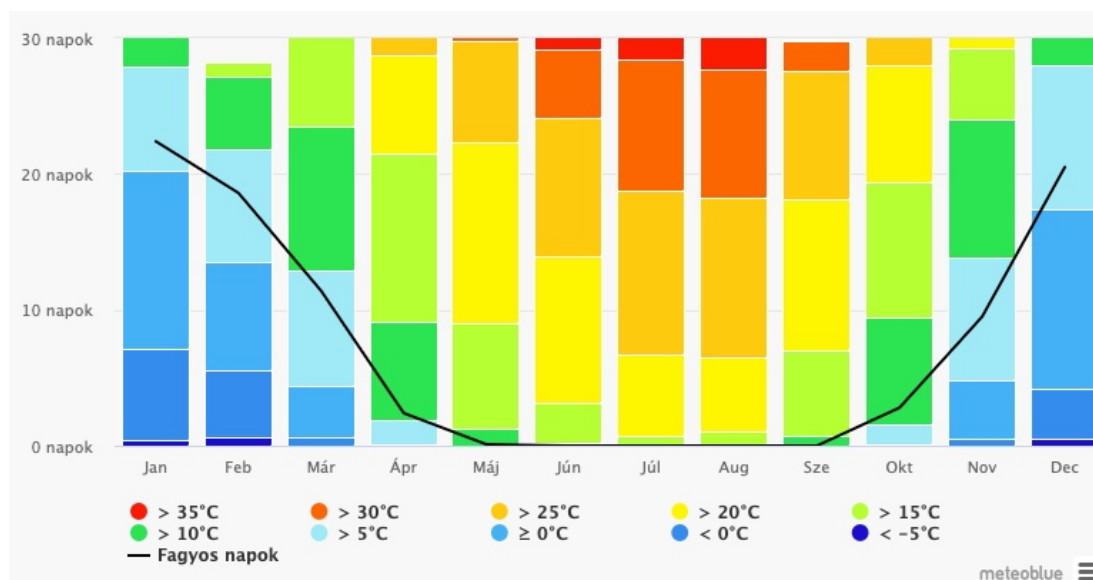
Az üvegház-esővíztároló kombinációhoz elengedhetetlen, hogy az adott területre vonatkozó meteorológiai adatokkal tisztában legyünk. Az üvegház modellezésekor szükséges információ a külső léghőmérséklet. Az információkat a meteoblue (S.a) adatai alapján a 2.2. és a 2.3. ábrákon mutatom be.



2.2. ábra: Átlagos hőmérséklet és csapadékmennyiség a helyszínen.

[Szimulált történelmi éghajlati és időjárási adatok, meteoblue, (S.a.)]

A 2.2. ábrán és saját tapasztalataink alapján is jól látható, hogy az átlagos napi maximum mellett a forró napok hőmérséklete jelentősen közelíti a 40 [°C]-ot.



2.3. ábra: Maximum hőmérsékletek a helyszínen

[Szimulált történelmi éghajlati és időjárási adatok, meteoblue, (S.a.)]

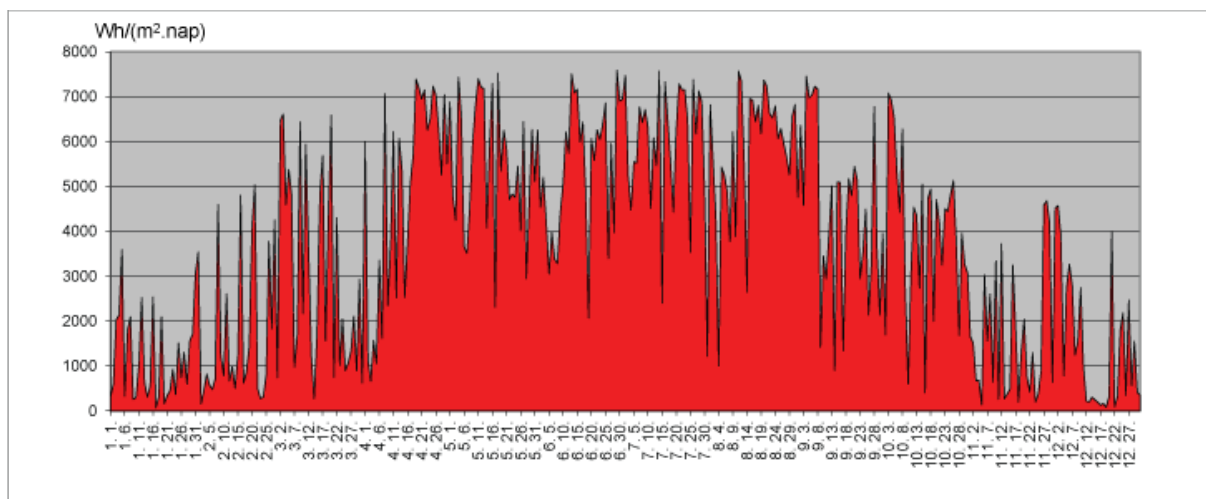
A 2.2. ábrán látható adatok mellett fontos a forró napok súlyozása is. Ebben segít számunkra a 2.3. ábra. Mint látható, az augusztusi adatok jelentik a jelen esetben fontos szélső értéket. Az augusztusra vonatkozó táblázati értékeket a 2.1. táblázatban részletezem.

2.1. táblázat: Historikus maximum hőmérséklet súlyozás augusztus hónapban a helyszínen
[Szimulált történelmi éghajlati és időjárási adatok, meteoblue, (S.a.)]

Hőmérséklet tartomány	Hőmérsékleti maximum súlya [nap]
> 35 [°C]	3,2
> 30 [°C]	9,5
> 25 [°C]	11,7
> 20 [°C]	5,5
> 15 [°C]	0,9
> 10 [°C]	0,1
> 5 [°C]	0
≥ 0 [°C]	0
< 0 [°C]	0
< -5 [°C]	0
Fagyos napok:	0

A 2.1. táblázatból jól látható, hogy a domináns maximum hőmérséklet a 25-30 [°C] közötti tartomány. Az adatok és Goldhammer (2019) leírása alapján ismert jellemző ideális növényházi vegetációs hőmérsékletek (22-31 [°C] növénykultúra függvényében) Egybecsengenek, ami alapján arra lehet következtetni, hogy ebben az időszakban a külső hőmérséklet megfelelő a jellemző növénykultúrák számára, azaz szellőztetéssel, vagy egyéb módszerrel a külső hőmérsékleten tartás megfelelő. Forróbb napokon, amiknek a száma a globális felmelegedés következtében várhatóan növekedni fog, valamilyen módon a növényházi tér valamilyen módon hűtésre szorul. Látható, hogy jelen esetben is az augusztusi hónap közel fele a hűtendő kategóriába esik a fent említett okok miatt.

Az üvegház esetén a külső hőmérséklet mellett fontos információ még a napból érkező besugárzási adatok ismerete. Ebben a 2.4. ábra lesz segítségre számunkra, ahol a jellemző napi besugárzási értékeket láthatjuk a helyszínrre vonatkoztatva.

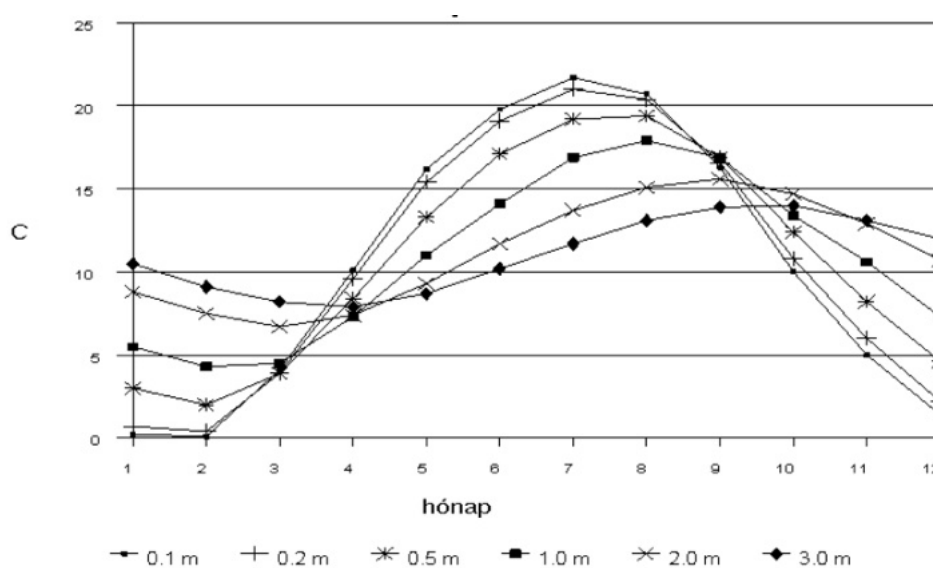


2.4. ábra: Napsugárzás napi értékei a helyszínen [Napsugárzási adatok 2013, Naplopó].

Az alapvetően nap energiájának hasznosítására létrehozott üvegház struktúra miatt a teljes légtér hűtése gazdaságosan nem kivitelezhető, azaz valamilyen módon közvetlenül a növények, vagy csupán zónák (gyökér, lomb) hűtésében érdemes gondolkozni. Ezen alapelvek mentén jöttek létre a korábbi hűtési megoldások.

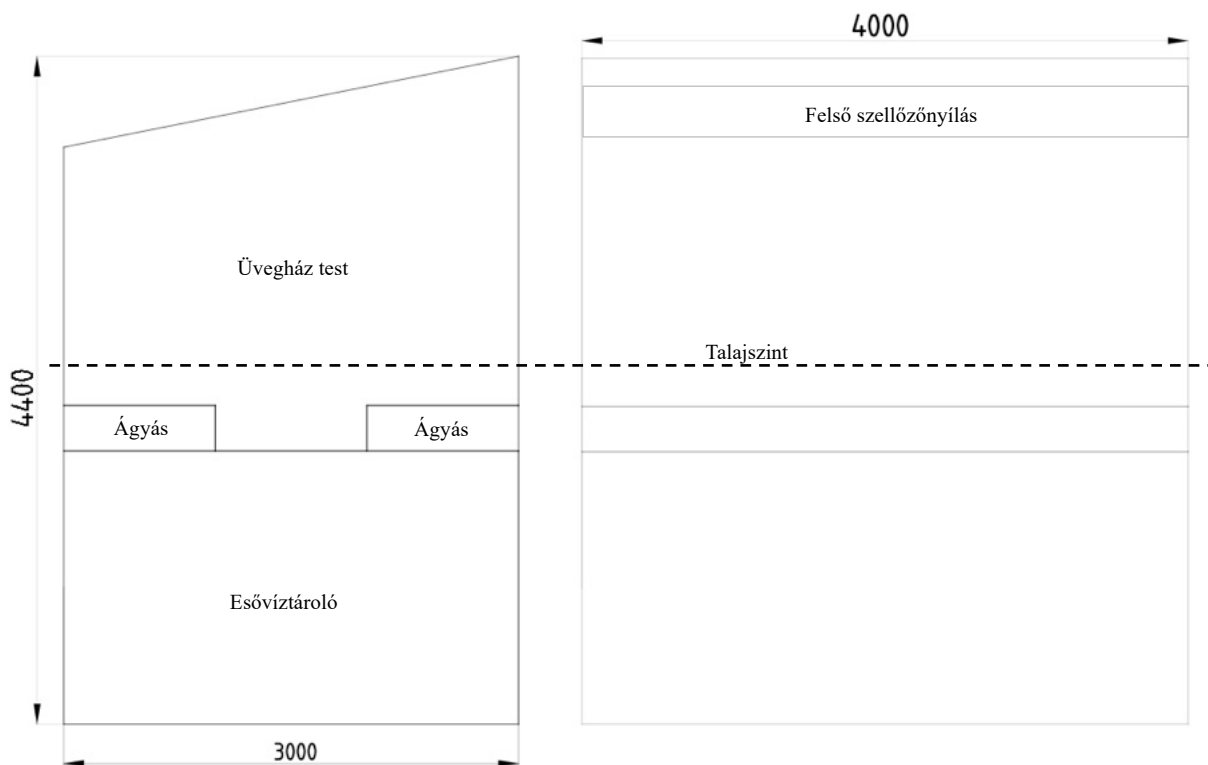
A VEM modellezést a korábban látott megjelenő külső hőmérsékletek okán 30, 35, 40 [°C]-on fogom elvégezni.

Jelen esetben a gyökérzóna hűtési lehetőségét fogom vizsgálni. A korábban említett struktúra okán a talaj egyéb tulajdonságai mellett a hőmérsékletét is figyelembe kell venni. Ebben segít számunkra a 2.5. ábra, amely a talajhőmérsékletek havi középértékeit mutatják be.



2.5. ábra: A talajhőmérséklet havi középértékei [Nagy és munkatársai (S.a.)]

A helyszínre tervezett üvegház konkrét paraméterei nem tisztázottak, így csupán a várható méreteket és egyszerűsített konstrukciókat alkalmazok a modellezés során. Az üvegház főbb méretei és elrendezése a 2.6. ábrán láthatók.



2.6. ábra: Az üvegház-esővíztároló egyszerűsített modellje és főbb méretei [saját munka]

Látható, hogy a tervezett üvegház egy 3*4 [m] alapterületű épület. A konstrukcióból adódóan az esővíztároló is azonos alapterülettel rendelkezik. A fedés féltető megoldással polikarbonát fedéssel történik. Az üvegház a talajba van süllyesztve 0,6 [m]-el, így is jobb hőháztartást biztosítva annak, valamint az így mélyebbre került esővíztároló is hűvösebb talajrétegekkel van kapcsolatban, így a hőelvonás jelentősebb.

Az üvegház belső elrendezése egyszerű három osztatú, a két hosszabbik oldalon 1-1 [m] széles 0,3 [m] magas ágyással számolva. A modellen nem látható a két szellőző nyílás, amely az alacsonyabbik oldalon a talaj felett 0,1 [m]-el, a magasabb oldalon a fedéstől 0,2 [m]-el alacsonyabban fekszik.

3. Célkitűzés

A korábban ismertetett környezetben a megadott paraméterekkel megvalósítandó üvegház-esővíztároló lehetséges energetikai szimbiózisát szeretném vizsgálni. A problémát jellegéből adódóan két részletre bontom:

- analitikai módszerekkel vizsgálható rész
- VEM módszerrel vizsgálandó rész.

Az esővíztároló szerepe ebben az esetben mint hő elnyelő egység van jelen. A geometria, az anyagok, a külső paraméterek ismeretében bizonyos paraméterek változtatásával az analitikus módszer automatizálásával képet kaphatunk az általam vizsgált tulajdonságok jellegéről. Az analitikus módszer automatizálására a Python kódot választottam. A vizsgálat részleteiről, a probléma sajátosságai érdekében módosított Fourier-egyenlet és a megoldás részletes leírását a 4. pontban teszem meg.

Az üvegház részegység vizsgálatát VEM szimuláció segítségével fogom elvégezni, melynek a paramétereit és menetét az 5. pontban fogom részletezni. A vizsgálat komplexitása miatt analitikai módszerekkel nem, vagy nehézkesen és pontatlanul lehetne vizsgálható. Jelen esetben egy hő- és áramlástan problémával állunk szemben. A napsugárzás, valamint a külső léghőmérséklet által felmelegített lég- és talajtömeg helyi hőmérséklet konszolidálását az ágyásokban elhelyezett Ø16 [mm] hűtőcsövekkel kívánom létrehozni.

A két modell vizsgálata közötti kapcsolatot az alkalmazott vízhőmérsékletek adják meg. Az üvegházban lévő növénykultúra befolyásolja az öntözésre alkalmazható vízhőmérsékletet, amelynek a tároló töltöttségével karöltve meghatározhatóvá teszi az állandósult állapotban elnyelethető maximális hőteltjesítményt.

Az üvegházban különböző környezetek modellezésével láthatjuk, hogy annak milyen hatása van a növényház talajának hőmérsékletére vonatkozóan.

A vizsgálatnál tehát szeretném megalapozni az öntözővíz növényházi környezetben történő hőtechnikai alkalmazásának módszerét, kiindulási alapot biztosítani további vizsgálatokra, a megoldás gyakorlati alkalmazhatóságának felkutatására.

A 4. és 5. pontban a fent említett vizsgálataimat írom le, a 6. pontban levonom a következtetéseket.

Eredményként az ágyáshőmérséklet jelentős csökkenését várom.

4. Esővíz tároló hőleadó képességének meghatározása analitikus módon

A probléma egyik felét az esővíz tároló talaj felé leadható hőmennyiségének meghatározása adja. Erre a probléma analitikus megoldását választottam. A mérnöki eszköztár egyre jelentősebb eszközt adja a Python-ban írt scriptek, programok alkalmazása. Ennek okán munkám során ennek alkalmazása mellett döntöttem. A megoldás előnye, hogy a struktúra megalkotása után már kisebb módosításokkal jelentős időt takaríthatunk meg a modell futtatása során.

Az adott körülmények között leadható hő ismeretében az üvegház oldal (hőfelvétel) méretezése lehetséges.

4.1. Peremfeltételek, és alkalmazott egyenletek

Az alkalmazott peremfeltételeket érdemes csoportokra bontva kezelni. Adódnak a geometriából peremfeltételek, mint az esővíztároló szélessége, hosszúsága, magassága. Ezek konstrukciós adatok.

Ezen felül hőtani peremfeltételeket (határolófal hővezetési tényezője), valamint környezeti peremfeltételeket (talaj hőmérsékletek) is figyelembe kellett vennem. Ezeket az adatokat Asadi és munkatársai (2007), valamint Nagy és munkatársai (S.a.) munkája alapján vettem fel.

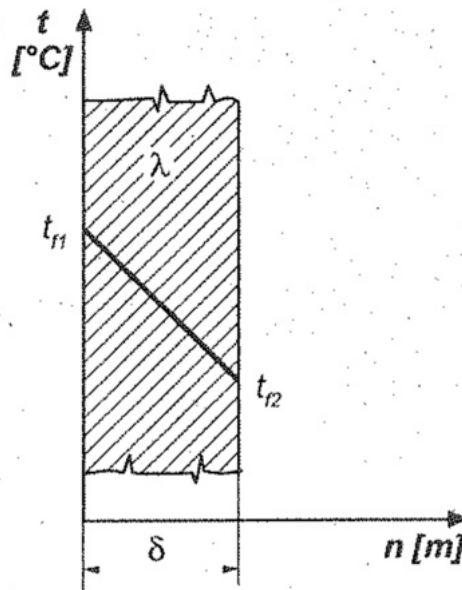
A leadható hőmennyiséget mivel esetünkben egyszerű síkfalakról van szó, a Fourier-egyenlet egyszerű formája alapján számítottam. Az egyenlet jelen esetben is alkalmazható, mivel Farouki (1981) és Thomas (2008) alapján a környezet megfeleltethető az általános síkfalon történő hőátadási modellnek. Holics (1998) munkája alapján az egyenlet pedig a következő:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta} \cdot A \cdot \tau$$

ahol:

- | | | |
|--------------|--|-------------------|
| - Q | – hőmennyiség | [Ws] |
| - λ | – hővezetési tényező | [W/mK] |
| - τ | – idő | [h] |
| - δ | – falvastagság | [m] |
| - Δt | – hőmérsékletkülönbség a két határfelület között | [°C] |
| - A | – vizsgált felület | [m ²] |

A 4.1. ábra az egyrétegű síkfal hővezetési modelljét ábrázolja.



4.1. ábra: Egyrétegű síkfal hővezetési modellje [Beke (2000)]

Mivel jelen esetben állandósult állapotról beszélünk, az idő tényező elhagyható. A test felülete mentén történő változó hőmérséklet eloszlás miatt a probléma megoldásához a testet részekre bontottam. Az alsó síkfelületre és oldalfalra. Az alsó síkfelület (padló) esetében a Δt értékét meghatározni nem okoz problémát, mivel a talajhőmérséklet változása ekkora kiterjedés esetén vízszintes irányba elhanyagolható. A palástfelületet tekintve azonban a hőmérséklet eltérő. A probléma megoldásához a meglévő adatok alapján egy görbét interpolálok a felület mentén történő hőmérsékletváltozás leírásához. A görbe ismeretében a külső oldalfal átlagos hőmérsékletének megadásához a görbét a töltöttségi fok határai között integrálok, majd osztom az érintett magasság hosszával. Ez a megoldás a korábban bemutatott Fourier-egyenlet jellegéből kiindulva elfogadható, mivel az nem tartalmaz olyan matematikai műveletet, amely miatt a fent említett megoldás hibát okozna. Így tehát a felület hőátadása a következő elemekből tevődik össze:

$$Q_{palást} = \lambda \cdot \frac{t_{víz} - \frac{\int_{h-h \cdot K}^h t_{interp}(h) dh}{h \cdot K}}{\delta} \cdot A_{palást} \cdot K$$

$$Q_{padló} = \lambda \cdot \frac{t_{víz} - t_{talaj(-2,4)}}{\delta} \cdot A_{padló} [W]$$

$$Q_{teljes} = Q_{palást} + Q_{padló} [W]$$

ahol:

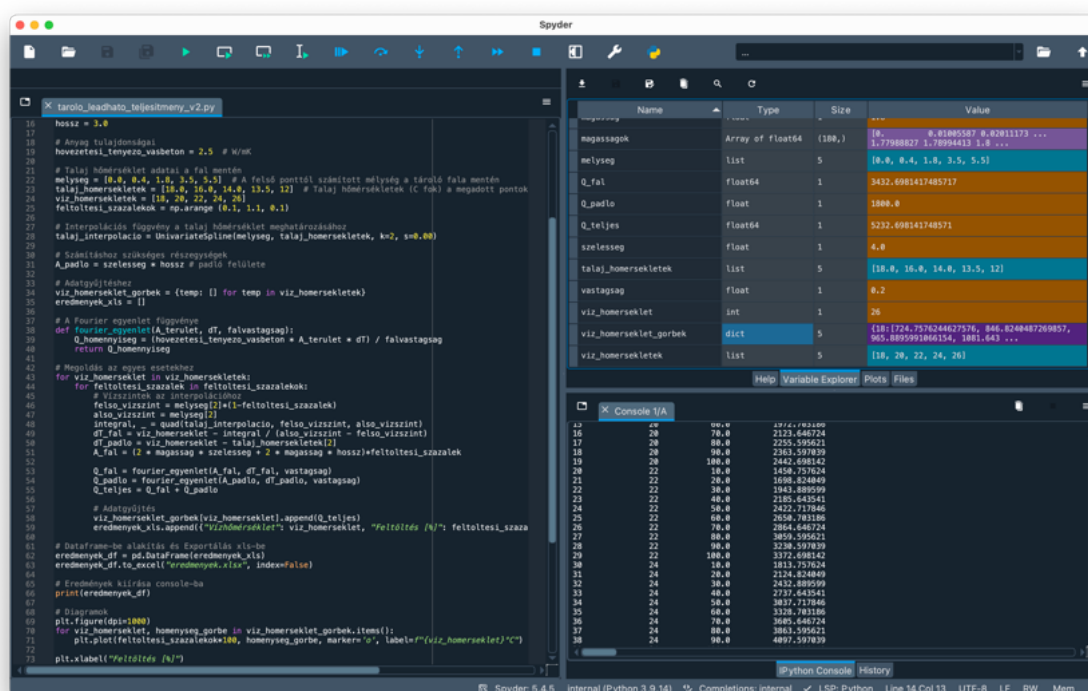
- Q_{teljes}	– teljes elnyelethető hőmennyiség	[Ws]
- $Q_{\text{padló}}$	– padló irányába elnyelethető hőmennyiség	[Ws]
- $Q_{\text{palást}}$	– palástfelületen elnyelethető hőmennyiség	[Ws]
- λ	– hővezetési tényező	[W/mK]
- $t_{\text{interp}}(h)$	– interpolált hőmérséklet görbe egyenlete	[-]
- $t_{\text{víz}}$	– víz hőmérséklete	[°C]
- δ	– falvastagság	[m]
- $A_{\text{padló}}$	– esővíztároló padlófelülete	[m ²]
- $A_{\text{palást}}$	– esővíztároló palástfelülete	[m ²]
- K	– töltöttségi fok	[-]
- h	– esővíztároló magassága	[m]

Az esővíztároló és az üvegház között a talajborítás miatt adiabatikus felülettel számolok ebben az esetben.

A vizsgált víz hőmérsékleteket kiválasztásakor a kertészeti körökben elfogadott ökölszámot használtam, hogy a növény számára az ideális vegetációs hőmérséklettel megegyező öntözővíz alkalmazása megfelelő. Mivel különböző növénykultúrák is érintettek lehetnek az üvegházban, így a 18 [°C]-os alaphőmérséklettől indulva 2 [°C]-os lépcsőkben 26 [°C]-ig határoztam meg a vizsgálandó hőmérsékleteket.

4.2. Python kód megalkotása

A probléma megoldására a Python programnyelv alkalmazását választottam. Ez a nyelv a mai adatfeldolgozás/manipulálás, MI rendszerek népszerű eszköze. Esetemben a számításokat, valamint az adatok feldolgozását végeztem el ebben a környezetben. A kód megírásához a Spyder IDE-t választottam. A kód részletébe és a környezetbe a 4.2 ábra mutat betekintést. A kód megalkotása McKinney (2020) munkája, Scipy documentation (2019), Hunter és munkatársai (2019) munkája és Numpy documentation (2020) alapján történt.



4.2. ábra: Az általam írt kód részlete és a Spyder IDE környezet [saját ábra]

A probléma megoldását a szükséges könyvtárak és függvények meghívásával kezdtem. Ezek listázva rövid magyarázattal a következők:

- **NumPy (Numerical Python):** Gyakran alkalmazott Python könyvtár, amely széles körben használt tudományos és numerikus számítási feladatokhoz. A NumPy az egyik alapvető építőköve a tudományos és mérnöki alkalmazásoknak Python nyelven. Többek között tömbök és mátrixok kezelésére, matematikai műveletekre alkalmazzák. Összességében a tudományos- és numerikus számítások Pythonban történő implementálásának egyik elengedhetetlen építőköve.

- **SciPy.interpolate.UnivariateSpline:** Ez a függvény segít egydimenziós interpolációt és simítást végezni Pythonban. A függvény használatakor meg kell határoznunk a k és az s értékét, amelyek a Spline görbe fokát, valamint a simítás (smoothing) mértékét határozzák meg.
- **SciPy.integrate.Quad:** Ez a függvény numerikus integrálást végez egy adott függvényen a hozzá megadott intervallumok figyelembe vételével.
- **Matplotlib.Pyplot:** Ezt a könyvtárat adatok megjelenítéséhez és vizualizációjához használhatjuk.
- **Matplotlib.Cm:** A diagramok kinézetének módosításához, színskála használatkor volt szükségem erre a könyvtárra.
- **Pandas:** Ez a könyvtár egy gyakran alkalmazott adatmanipulációs és adatelemző képességekkel rendelkező eszköz. A könyvtár két alapvető adatstruktúrát használ: A Series-t és a DataFrame-et (egy- és kétdimenziós adatstruktúra). A könyvtár még jól alkalmazható adatbetöltésre és mentésre (exportálásra), adatmanipulációra, indexelésre és szűrésre, valamint többek között adatok csoportosítására és aggregálására.

A könyvtárak meghívását követően a szükséges konstansok megadására volt szükség. Ezeket a 4.1. táblázatban részletezem.

4.1. táblázat: A kódban megadott konstansok [saját munka]

Megnevezés	Konstans neve a kódban	Mennyiség	Mértékegység
Tároló magassága	magassag	1,8	[m]
Tároló szélessége	szelesseg	4	[m]
Tároló hossza	hossz	3	[m]
Tároló falvastagsága	vastagsag	0,2	[m]
Fal hővezetési tényezője	hovezetesi_tenyezo_vasbeton	2,5	[W/mK]

A konstans adatok mellett a 2.5. ábrában látható talaj hőmérséklet adatokat az ismert műszaki tartalomra vonatkozóan megadtam két listában. Az egyikben a tároló felső pontját véve referenciapontként az adatpontokkal rendelkező magasság pontokat, egy másik listában pedig a hozzá tartozó hőmérséklet értékeket. A probléma jellegét tekintve a vizsgálat szempontjából leginkább kedvezőtlen hónapot vettem figyelembe.

Ezen kívül külön listában felsoroltam az esővíz tárolóban vizsgálandó víz hőmérséklet értékeit, valamint a feltöltési százalékokat. Utóbbit a numpy arange függvényével tettem meg.

Következő lépésként univáris szükséges alegységeket határoztam meg, mint a padló alapterülete, talaj hőmérséklet interpolált görbéje a fal mentén, az adatgyűjtéshez pedig üres listát és asszociatív tömböt hoztam létre.

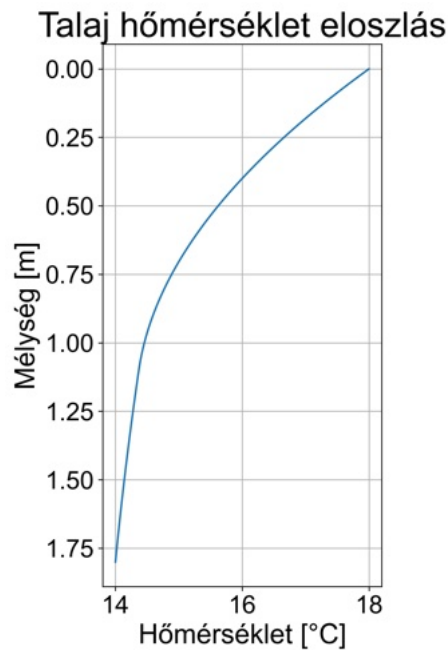
A felsoroltakat követően a számítás egységeit kellett meghatározni. Erre létrehoztam egy függvényt a Fourier-egyenlet megoldására, majd az egyes esetek megoldásához egy egymásba ágyazott függvény rendszert hoztam létre. A külső függvény az adott vízhőmérsékleteket vette figyelembe, a belső pedig a feltöltési százalékonként végezte el az aktuális hőmérséklethez a meghatározott számításokat.

A belső függvényben meghatároztam a feltöltési százalékok alapján a víz felső pontját, majd Scipy.Integrate quad parancsával elvégeztem az integrálást az interpoláció adott pontjai között. A kód következő részében külön választottam a tárolót alsó és oldalsó határoló felületekre, majd az arra vonatkozó hőmérséklet különbségeket, falfelületet és leadható hőmennyiséget számítottam. A számítások eredményét az előre meghatározott adatgyűjtő változókhoz hozzáadtam.

A kód további része az eredmények dataframe-be való alakítását, xlsx formátumba történő exportálását, console-ba történő kiírását, valamint a diagramok ábrázolását foglalja magában. A teljes kód a 12.1. mellékletben látható.

4.3. Eredmények

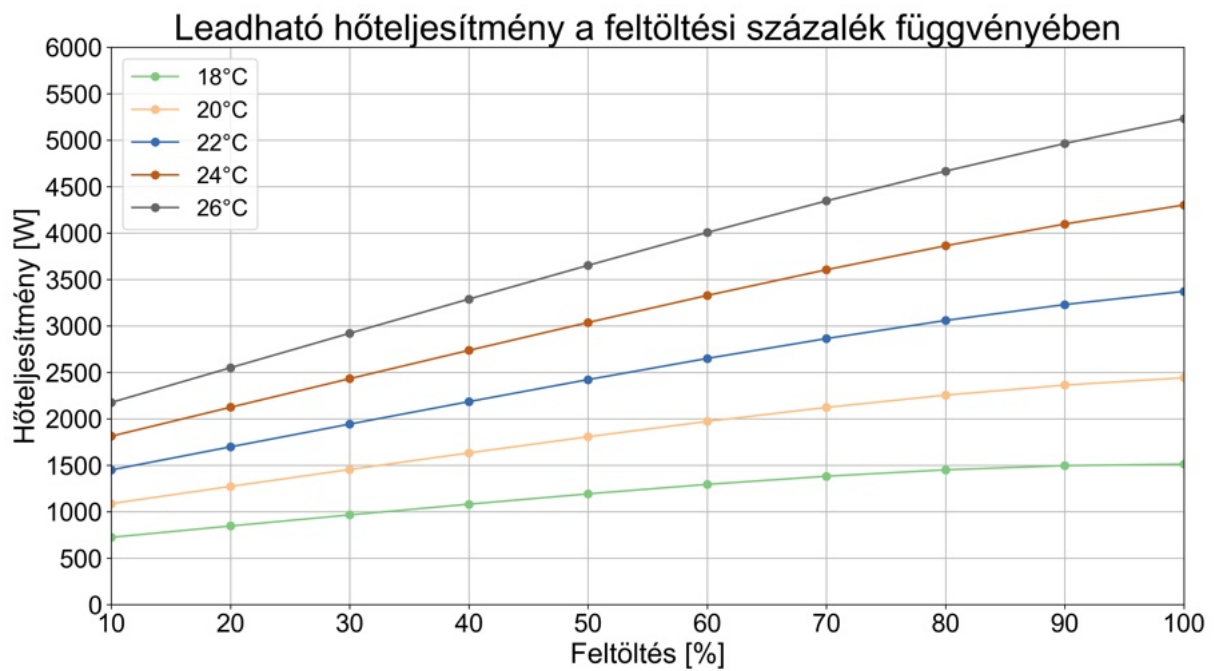
A főbb eredményeket diagramként is kirajzoltattam a kód segítségével. Az első főbb diagram az esővíztároló függőleges fala mentén lévő interpolált hőmérséklet görbe. Ez a 4.3. ábrán látható.



4.3. ábra: Az esővíztároló fala mentén alkalmazott interpolált hőmérséklet görbe [saját ábra]

A hőmérséklet görbe függőleges tengelyén a Mélység látható az esővíztároló felső pontját tekintve bázisnak. A vízszintes tengelyen a hőmérsékletek olvashatóak le.

A 4.4. ábrán a görbesereg az esővíztároló falán keresztül elnyelethető hőmérsékleteket mutatják be vízhőmérsékletenkénti bontásban különböző tároló töltöttségi fokok esetén.



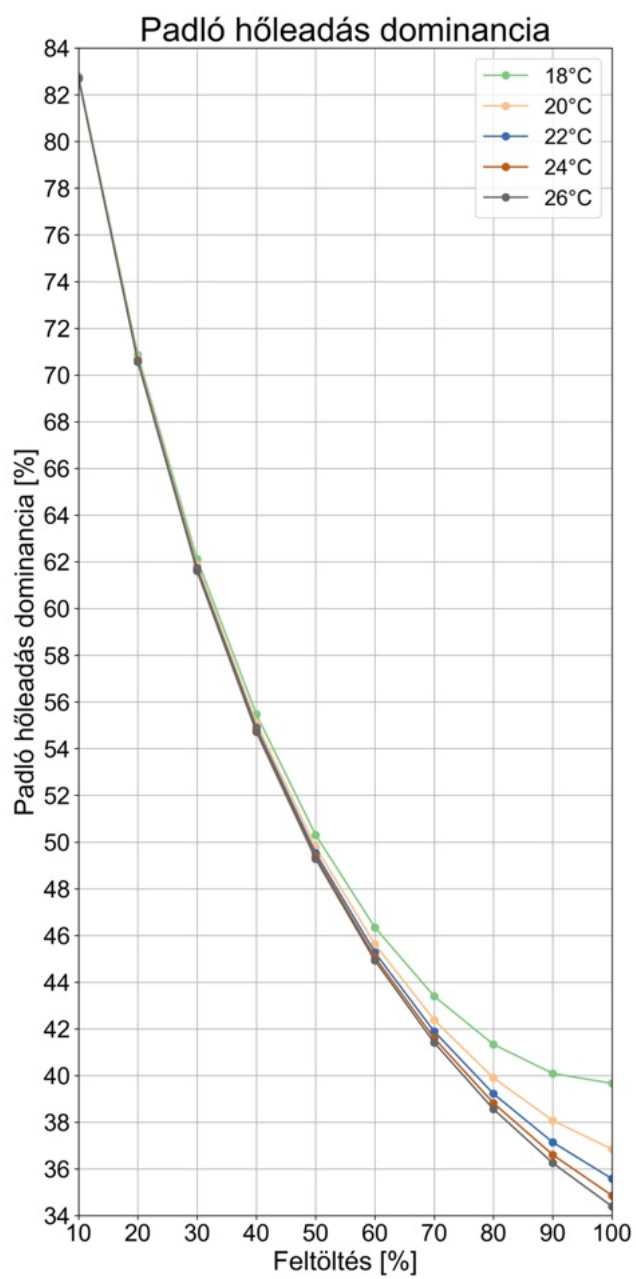
4.4. ábra: Tároló falán elnyelethető hőteljesítmény vízhőmérsékletenként különböző töltöttségi fokok esetén. [saját ábra]

A diagramon jól látható az esővíztároló falán jelentkező hőmérséklet különbség (interpolált görbe) hatása. Alacsonyabb vízhőmérséklet esetén a hőátbocsátásra jelentős hatással van a felszín közeli átmelegedett talajréteg gátló hatása. A 4.4. ábrán látható görbéket alkotó adatokat számszerűen a 4.2. táblázat tartalmazza. Az egyéb számított és exportált adat a 12.2. mellékletben található.

4.2. táblázat: A számított eredmények az elnyelethető hőteljesítményre [saját munka]

Esővíztároló töltöttségi foka [%]	Elnyelethető hőteljesítmény vízhőmérsékletenként [W]				
	Vízhőmérsékletek [°C]				
	18	20	22	24	26
10	724,8	1087,8	1450,8	1813,8	2176,8
20	846,8	1272,8	1698,8	2124,8	2550,8
30	965,9	1454,9	1943,9	2432,9	2921,9
40	1081,6	1633,6	2185,6	2737,6	3289,6
50	1192,7	1807,7	2422,7	3037,7	3652,7
60	1294,7	1972,7	2650,7	3328,7	4006,7
70	1382,6	2123,6	2864,6	3605,6	4346,6
80	1451,6	2255,6	3059,6	3863,6	4667,6
90	1496,6	2363,6	3230,6	4097,6	4964,6
100	1512,7	2442,7	3372,7	4302,7	5232,7

Látható, hogy a növénykultúra számára még elfogadható, egészséges öntözővíz hőmérséklet esetén maximálisan 5 [kW]-nál jelentősen több hőteljesítmény elnyeletése ebben a konstrukcióban nem megvalósítható. A diagramból és a táblázatból tehát az adott vízhőmérséklet (növénykultúra függő lehet) és töltöttségi fok mellett elérhető legnagyobb leadható hőmennyiség látható, ami egy adott szituációban az állandósult állapotot jelenti. Tehát egy adott hűtési esemény során a kezdetekben is az adott hőmennyiség elvehető az üvegházból, azonban az első szakaszban ekkor a talaj felé történő hőleadás is megtörténik az állandósult állapot eléréséig. A fentiekén kívül még a 4.5. ábrán látható a padló felé történő hőleadás dominanciája adott hőmérsékletek és töltöttségi szintek mellett.



4.5. ábra: A padló hőleadás dominanciája [saját ábra]

A diagramon látható, hogy a padló irányába történő hőleadás domináns a modellben.

5. Üvegház lég- és hőáramlási vizsgálata VEM alapokon.

Az üvegház hő- és áramlástan modellezését az Az Ansys CFX programjában Ansys CFX Solver Theory Guide (2009) alapján végeztem. A választásom többek között azért erre a programra esett, mivel az Ansys CFX az egyik vezető CFX software, amely képes szimulálni komplex hő- és áramlástan eseteket különböző mérnöki problémák esetén. Erre jó példák az aerodinamika, hőátadás, égés, vegyipar, energiaipar és egyéb műszaki területek.

A software főbb jellemzői:

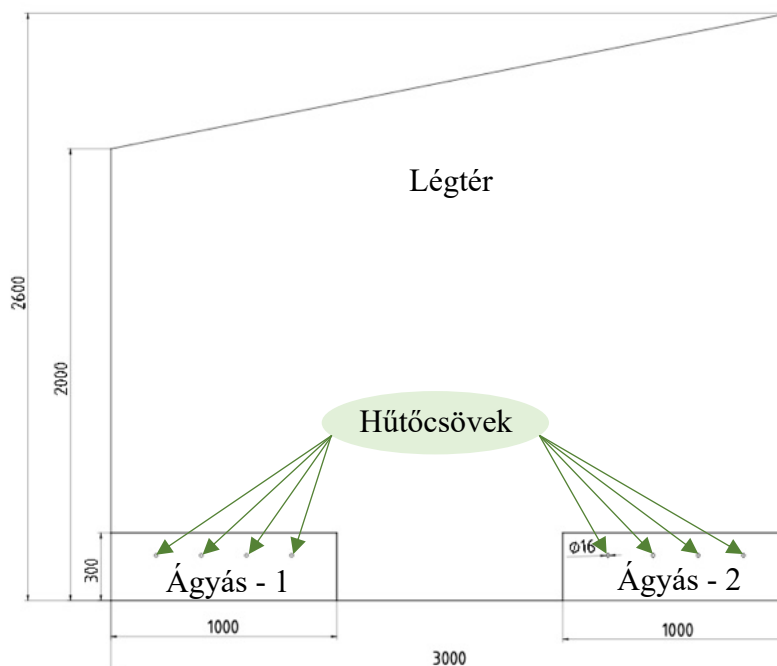
- Áramlásmodellezés: Lehetővé teszi áramló közegek viselkedésének részletes modellezését, ideértve a turbulenciát, kompresszibilitást és egyéb más komplex jelenségeket. A szoftver számos különböző áramlásmodellezési technikát támogat, például RANS, LES és DNS.
- Hőátadás: A hőátadások modellezése ahogy esetemben is, úgy egyéb mérnöki alkalmazások esetén is kulcsfontosságú. Az software lehetővé teszi a hővezetés, konvekció és sugárzás részletes modellezését, így például a hőcserélők, hőcserélők és hűtőrendszerek hatékonyságának elemzését.
- Égés: Az ANSYS CFX lehetővé teszi a vegyipari reakciók és égés modellezését. Ez kulcsfontosságú az égésmotorok, gázkazánok és egyéb égési rendszerek tervezésében.
- Vegyi reakciók: A program lehetővé teszi különböző vegyi reakciók és reakciókinetikák modellezését, ideértve az összetett vegyi folyamatokat is.
- Összeütközés és nem egyensúlyi áramlás: A software lehetővé teszi az áramlás nem egyensúlyi jelenségeinek modellezését, például a nagysebességű ütközéseket vagy robbanásokat.
- Múltbeli és jövőbeli szimulációk: A CFX képes hosszú távú, stacionárius és tranziens szimulációk elvégzésére is.
- GUI felület: A software egy felhasználóbarát grafikus felülettel rendelkezik, amely egyszerűsíti a szimulációk beállítását és eredményeinek vizsgálatát a programkódokkal kevésbé otthonosan mozgó mérnökök számára is.
- Integráció más ANSYS termékekkel: Az ANSYS CFX könnyen integrálható más ANSYS szimulációs termékekkel, így komplexebb fizikai vizsgálatokat is végezhetünk a programcsaládon belül.

5.1. Körülmények, alapbeállítások (MODELL)

A modellezést a CAD software-ben erre a célra létrehozott modell importálásával kezdtem. A szimulációs modellre két okból volt szükség:

- Az ANSYS CFX Academic licenc-el rendelkező programját használtam, amely hardware-es korlátokon túl az elemszámot/csomópontok számát is korlátozza. Ez azt jelenti, hogy nagyobb modell esetén a modell nem fut le, vagy a hálózást olyan módon kell módosítani, hogy az eredmények pontossága jelentősen sérül.
- Amennyiben a fent említett probléma nem áll fenn, a modell méreteiből adódóan a számítási igényt (gépidő) jelentősen növelte volna a teljes modell használata.

A fent említett okok miatt tehát az eredeti modell 0,05 [m] vastag szeletét vizsgáltam. Ennek hátránya, hogy az oldalfalaknál jelentkező hőbevitel nem jelentkezett a modellen, viszont a korábban említett feladatnak, minthogy megalapozza a további vizsgálatokat, a modell ilyen formában is teljes mértékben megfelelt. A modell főbb méretei az 5.1. ábrán láthatók.

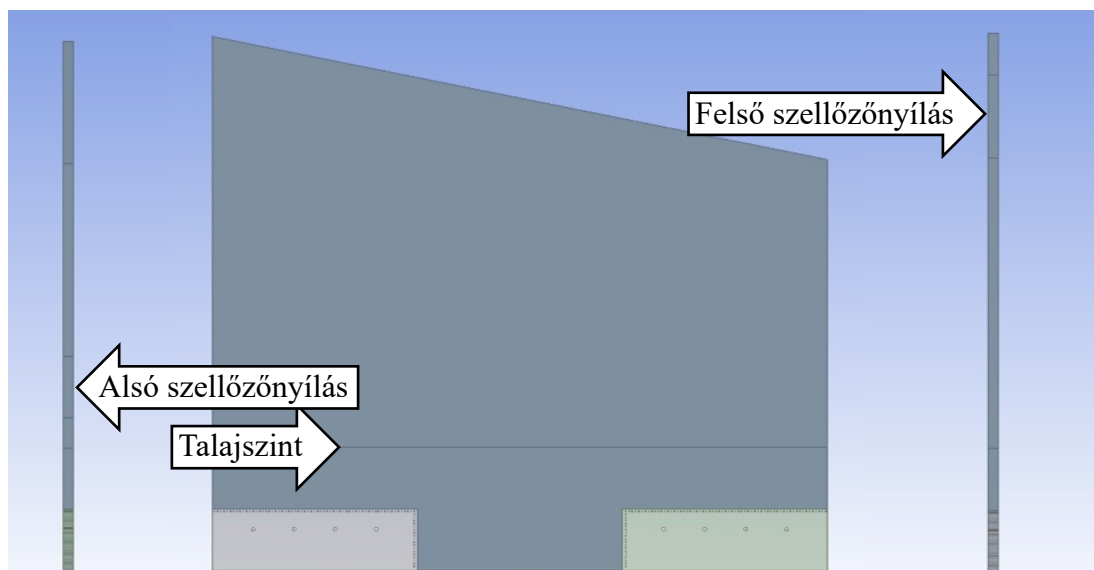


5.1. ábra: A modell főbb méretei és elemei [saját ábra]

Az ábrán tehát látható, hogy az üvegház „szelet” három főbb egységből áll. Az üvegház légtérét adó nagyobb testből, valamint a két ágyásból. Az $\varnothing 16$ [mm] hűtőcsövek az ágyás felső felülete alatt 0,1 [m]-el vannak lefektetve a modellben egységesen 0,2 [m] osztásközzel.

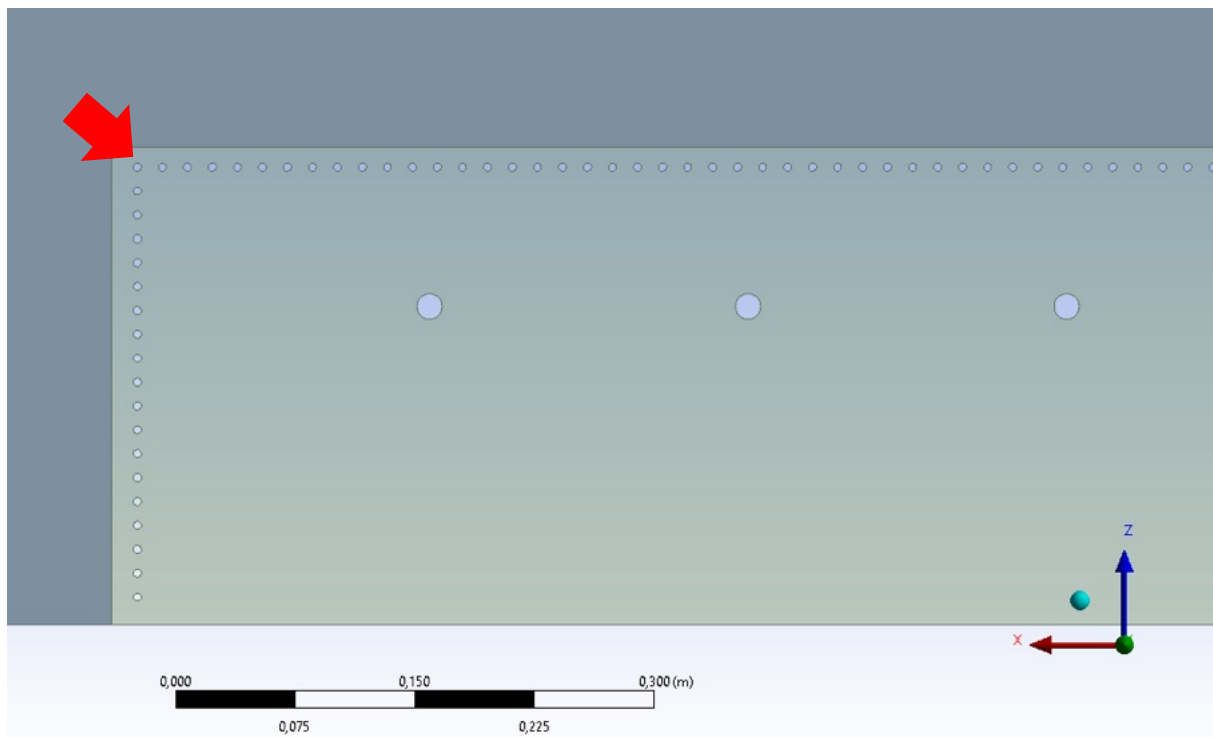
5.2. Modell előkészítése

Az importált modellen programspecifikus módosításokat kellett végrehajtanom. A légtér részen „Imprint Faces” parancs segítségével ki kellett jelölnöm a szellőzőnyílásokat, valamint a talajba süllyesztés vonalát. Erre azért volt szükség, hogy később a modell felparaméterezése során külön peremfeltételeket tudjak megadni az adott felületeknek. Ezeket a felületek az 5.2. ábrán láthatók.



5.2. ábra: Paraméterezés érdekében történt szétválasztott felületek [saját ábra]

A modell korai futtatásai során előforduló problémák miatt a nap hőszugárzását eredetileg az abszorber ágyásfelületre történő felparaméterezése sorozatos számítási hibákat okozott, ezért alternatív megoldásként az ágyásfelület közvetlen közelében 5 [mm] átmérőjű furatokat helyeztem el úgy, hogy a furatok által létrejött felületek mérete megegyezzen az eredeti abszorber felülettel. Így erre a felületre már problémamentesen meg lehetett adni a szükséges paramétereket és a modell futtatása során sem okoztak problémát, ugyanakkor későbbi felhasználás, valamint az eredmények értelmezésekor figyelembe kell venni ezt a körülményt is. A létrehozott furatok az 5.3. ábrán láthatók.



5.3. ábra: A létrehozott napsugárzást imitáló abszorber felületek (furatok) [saját ábra]

A későbbi paraméterezés megkönnyítése érdekében a testeket és felületeket/felületcsoportokat ajánlott elnevezni, így a felületeket az 5.4. ábrán látottak alapján szisztematikusan elneveztem.

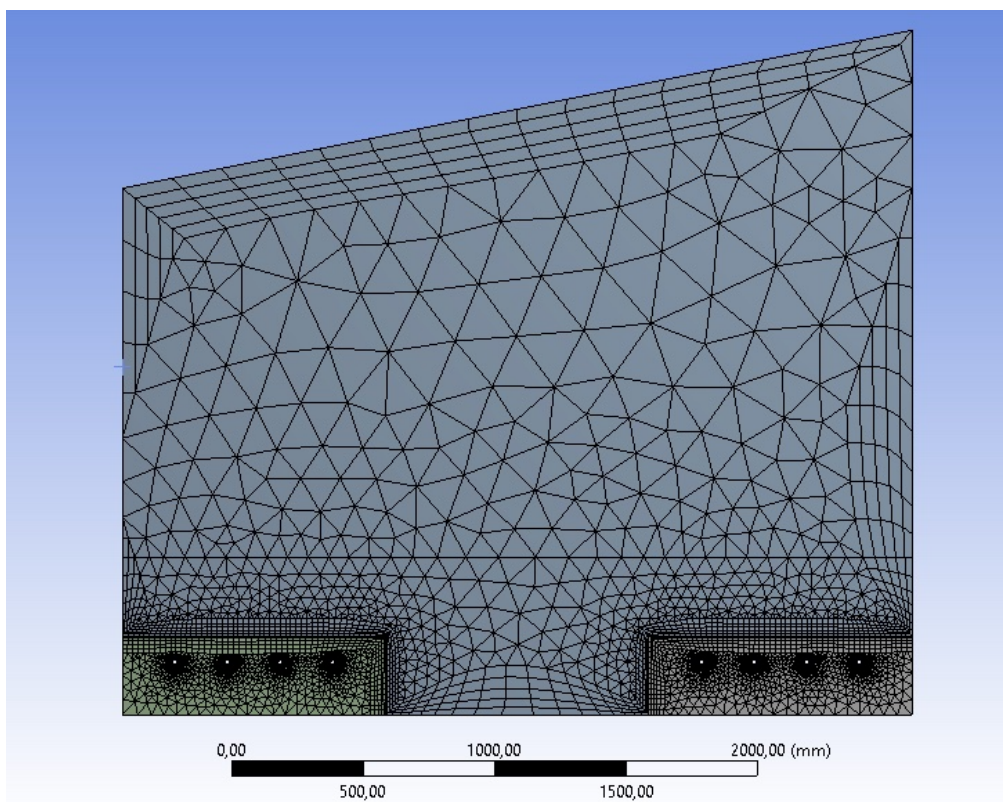


5.4. ábra: A DesignModeler-ben létrehozott felületek/felületcsoportok [saját ábra]

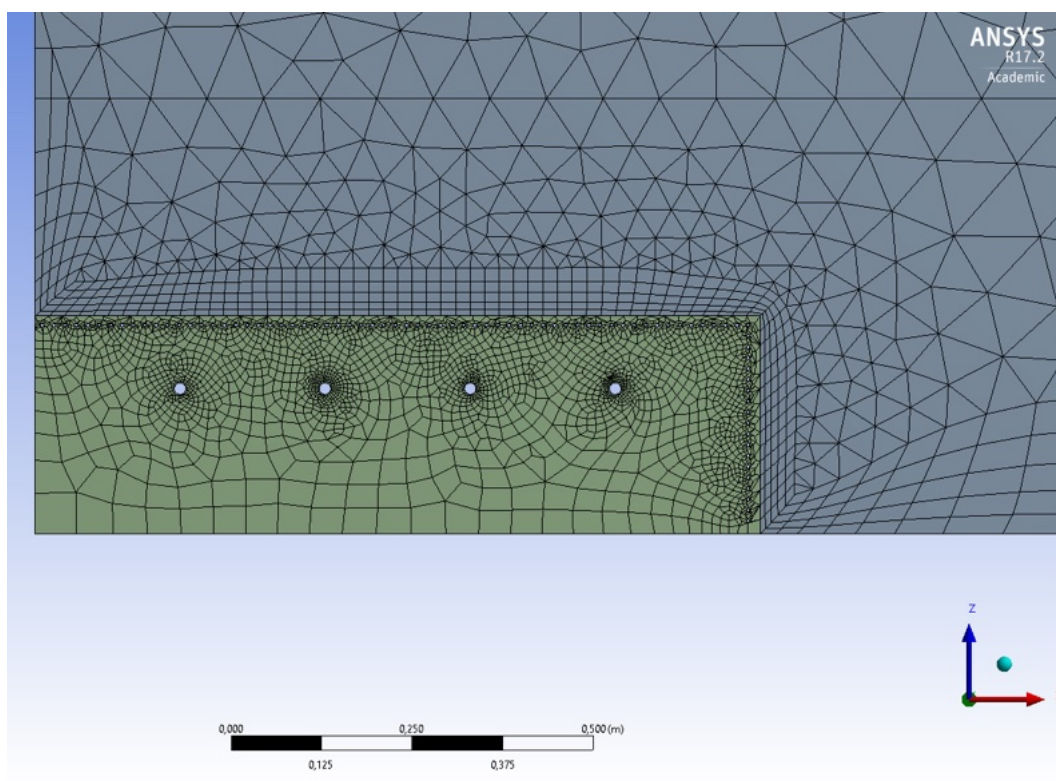
A modell ezen részével a továbbiakban feladatomban nem volt, a következő lépés a modell hálózásának létrehozása, szükség esetén módosítása. A program „Mesh” felületében a hálózás során a következő paramétereket kellett beállítani/módosítani:

- a háló típusát légtérre vonatkoztatva tetrahedron alakúnak határoztam meg,
- a légáramlási felületek mentén határréteg hálózást (Inflation) állítottam be,
- a csatlakozó felületek mentén a hálózást 2 [mm] nagyságúként rögzítettem.

A létrejött hálózást az 5.5. és 5.6. ábra szemlélteti.



5.5. ábra: Az összes geometria hálózása [saját ábra]



5.6. ábra: A hálózás a furatok közelében [saját ábra]

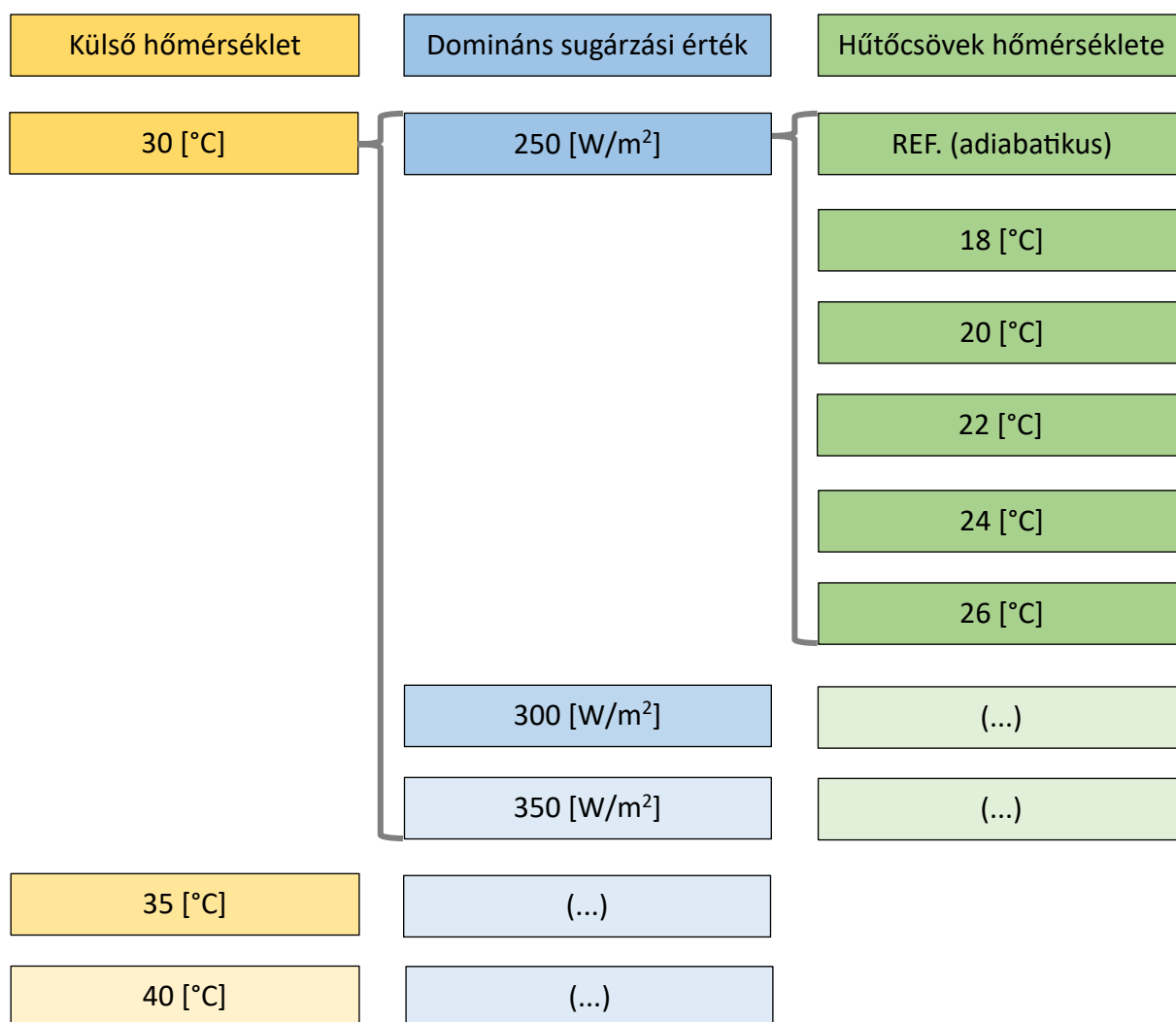
A hálózást követően a modellen belüli felületek tulajdonságait, valamint az alap adatbázisban nem szereplő talaj tulajdonságait adtam meg Soil Bulk Density (S.a), valamint Bowers és Hanks (1962) alapján. A megadott részletes adatokat a 12.3. melléklet tartalmazza.

A modell felparaméterezése tehát ebben a formában megtörtént. A következő lépés a modell futtatása, azonban a különböző esetekre fókuszálva a paraméterek módosításával több modellt is futtattam. A vizsgálati struktúrát az 5.3. fejezetben részletezem.

5.3. Vizsgálati struktúra

A komplexebb vizsgálat érdekében a modelleket különböző paraméterezéssel futtattam. A kezelhető mennyiségű modellmennyiség érdekében behatároltam a módosított paraméterek számát.

A 2. pontban részletezett okok miatt a problémás, hazánkban aktuális hőmérsékleteket figyelembe véve a külső hőmérsékleteket 30, 35, 40 [°C] hőmérséklettel, az elnyelt sugárzást tekintve (domináns felületre vetítve) 250, 300, 350 [W/m²] értékekkel, hűtőcső hőmérsékletet tekintve pedig az esővíztároló analitikus vizsgálatával megegyezően 18-26 [°C] között 2 [°C]-os hőmérséklet lépcsőkkel kalkuláltam. A fentiekén kívül a hűtővíz hőmérsékletek mellé felvettem egy referencia modellt is, amely során a hűtőcsöveket adiabatikusnak modelleztem. Ez a mérés hivatott a hűtés nélküli üzemet szimulálni. Az így felsorolt verziók kombinációja összesen 54 modellváltozatot jelent. A struktúrát az 5.7. ábra szemlélteti.



5.7. ábra: Vizsgálati struktúra [saját munka]

A részletes paramétereket a 12.4. melléklet tartalmazza.

5.4. Eredmények

A modellekből hőterképeket és áramlásképeket is kaptam, valamint A kilépő ponton átlaghőmérsékletet és átlagsebességet számítottam, az ágyások esetén külön-külön, valamint a légtér esetén is átlag, maximum és minimum értékeket is táblázatos formába gyűjtöttem. Ez 594 db adatpont, valamint a jegyzőkönyvek alapján 270 db ábra. Ennek okán a jegyzőkönyvekből csupán pár ábrát választottam, a szemléltetés érdekében. Az adatokat formázott diagram formában mutatom be a könnyebb érthetőség érdekében. A jegyzőkönyvek a mennyiségük miatt túlmutatnak még a mellékletek keretein is (a diplomadolgozat mellé csatolva feltöltöm), azonban a számított hőmérséklet adatsort csatolom a diplomamunkához a 12.5. mellékletben.

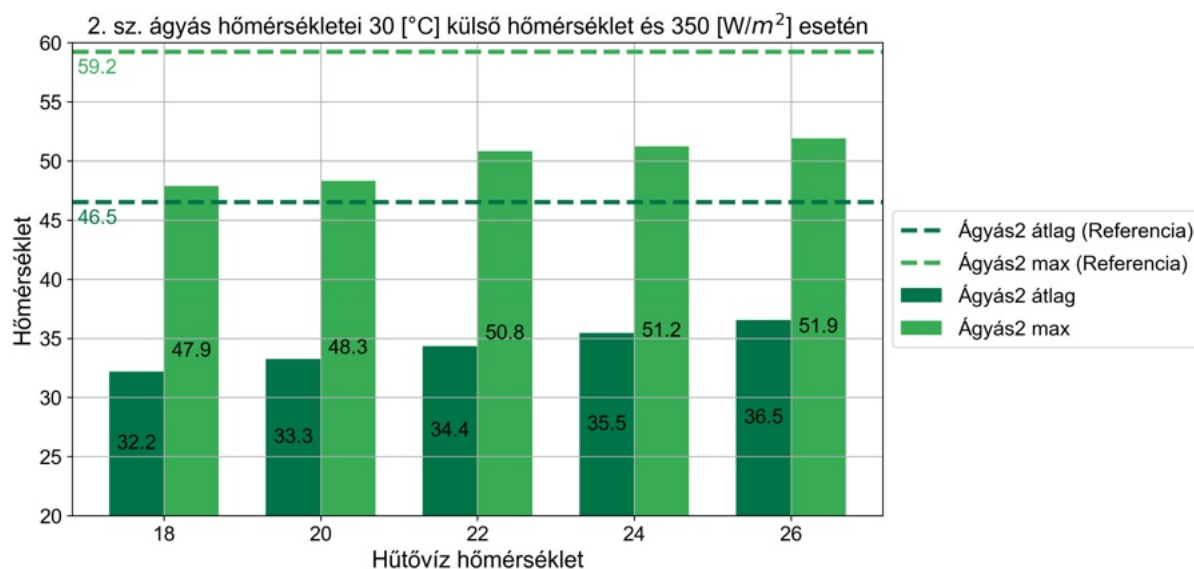
A könnyebb érthetőség érdekében az eredményeket vizsgált külső hőmérsékletek alapján is csoportokra bontva közlöm.

5.4.1. Eredmények 30 [°C] külső hőmérsékletű modellek esetében

A jelentős adatmennyiség miatt csupán bizonyos jellegzetes ábrát és diagramot mutatok be. A további diagramok a 12.6.1. mellékletben láthatók.

A vizsgálatok során a vizsgálat szempontjából legfontosabb eredmények a referenciaérték (hűtés nélkül) és a hűtéssel kialakult hőmérsékletek jellege az ágyás, valamint a légtér esetében. Ennek tudatában az ágyások közül kiválasztottam a vizsgálat szempontjából kedvezőtlenebbet, azaz a 2. számú ágyást, mivel itt a hőmérsékletek némileg magasabb értéket mutattak. A légtér esetében nem volt ilyen probléma.

A megadott paraméterek mellett az ágyás hőmérsékletek összehasonlításához a 350 [W/m²]-hez tartozó modell eredményeiből készült diagramot mutatom be az 5.8. ábrán.

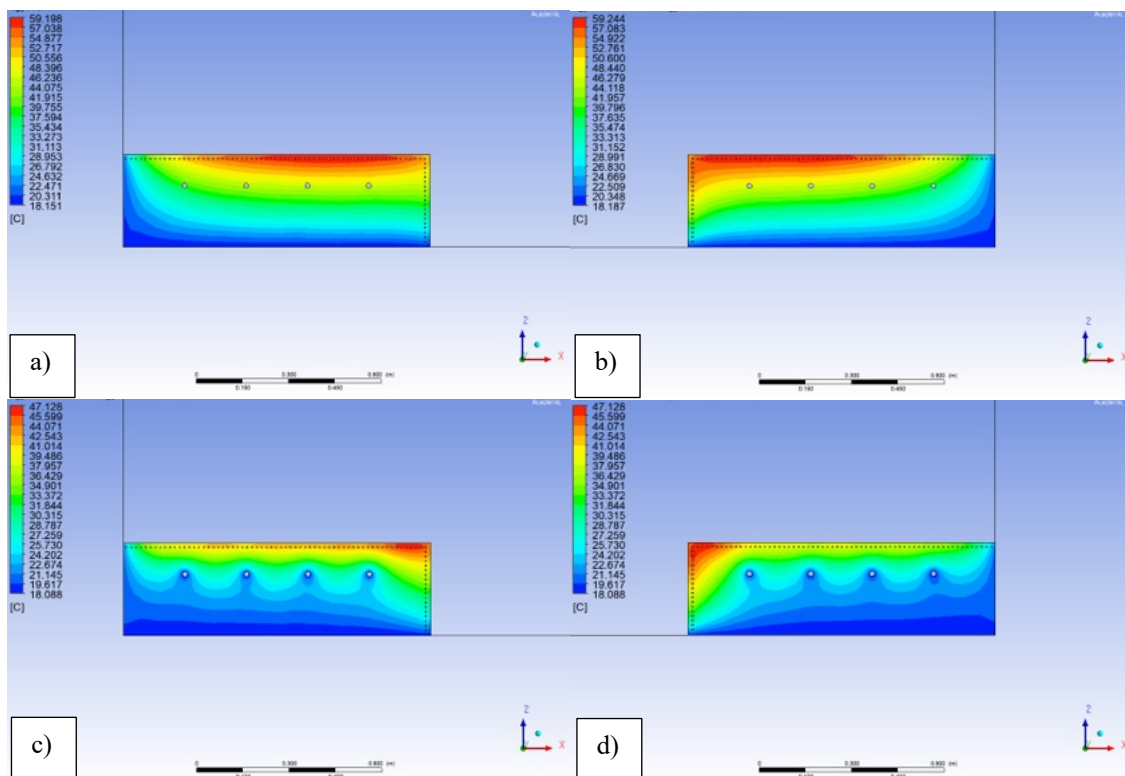


5.8. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

A diagramon jól látható, hogy az ágyás átlaghőmérsékletét a referenciaértékhez képest 10-14 [°C]-al, a maximum hőmérsékletet pedig 7-12 [°C]-al csökkentette a hűtőcsövek alkalmazása.

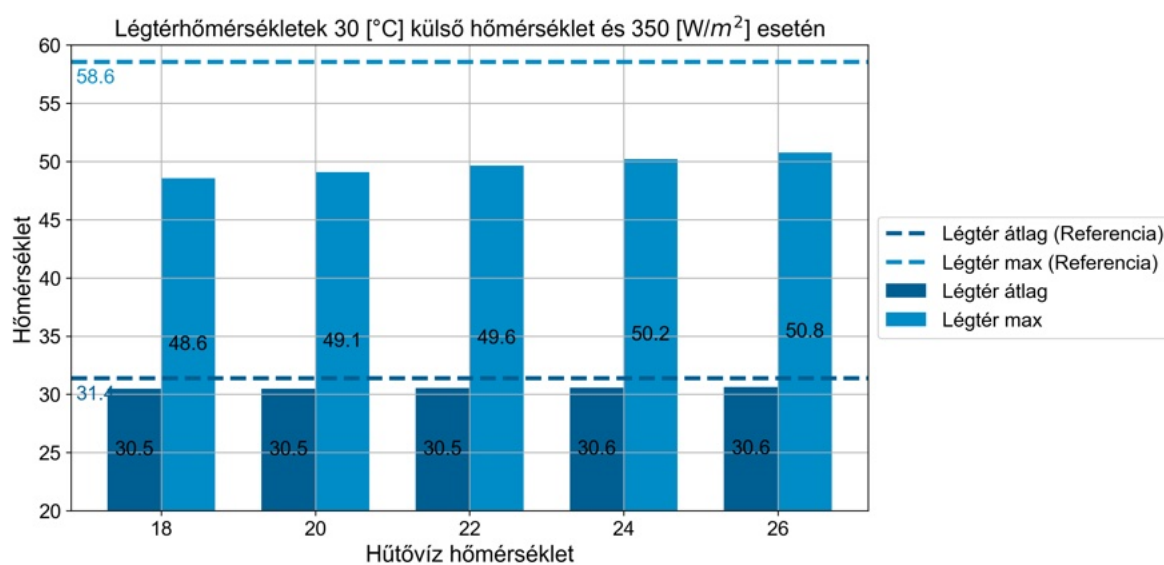
A hőmérséklet eloszlások demonstrálását a 5.9. sz. szemléltető ábrával kezdem.

Az ábracsoporton jól látható, ahogy a hűtőcsövek aktív alkalmazása esetén a talaj átmelegedését jelentősen képes lokalizálni a külső felületekre. Ennek tudható be, hogy az átlaghőmérséklet jelentősebb mértékben csökkent a maximumhoz képest.



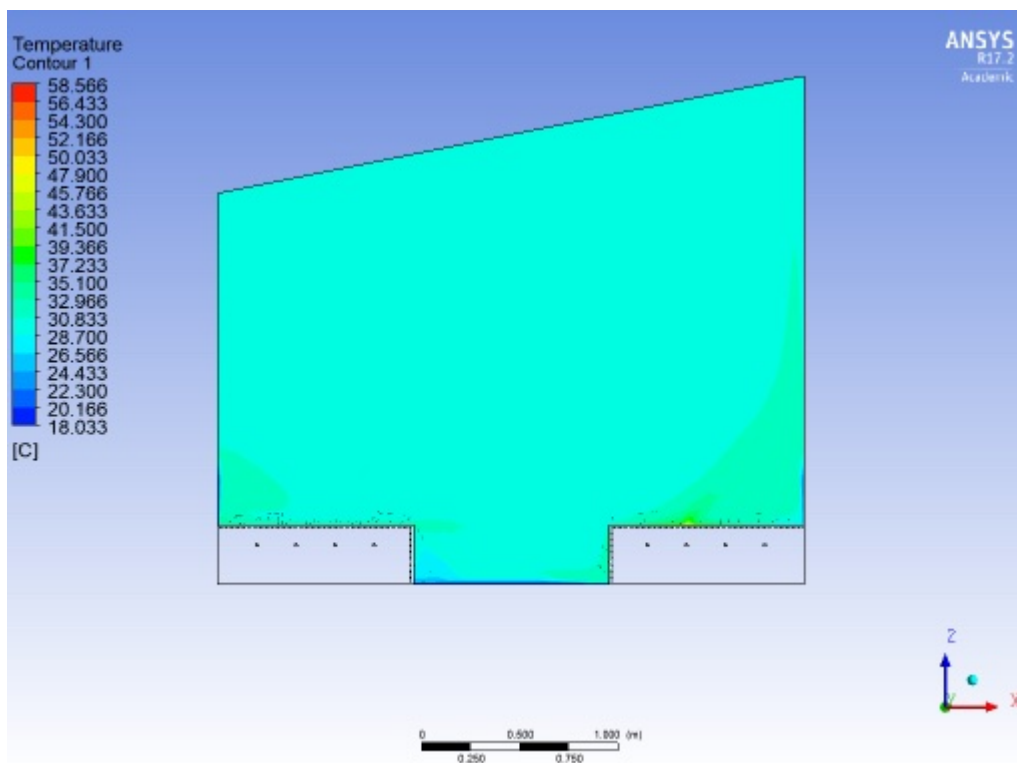
5.9. ábra: Hőmérsékletek alakulása az ágyásokban 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²]-es domináns napsugárzás mellett **a)** Ágyás1 referencia **b)** Ágyás2 referencia **c)** Ágyás1 18 [°C]-os hűtőcsövekkel **d)** Ágyás2 18 [°C]-os hűtőcsövekkel [saját munka]

A léghőmérséklet esetén az ágyás diagramjával ekvivalens készült a léghőmérséklet esetén is. Ez az 5.10. ábrán látható.



5.10. ábra: Léghőmérsékletek 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

A Léghőmérsékletek összehasonlító ábráján (5.10.) jól látható, hogy az átlaghőmérsékletre nincs jelentős befolyással a bemutatott hűtési rendszer, a maximum hőmérsékletet azonban 8-10 [°C]-ot képes moderálni. Az üvegház légtérének hőmérsékleti képét az 5.11. ábra szemlélteti. Jellemzően a vizsgált esetek nem tértek el egymástól, csupán a hőmérséklet értékek módosultak.

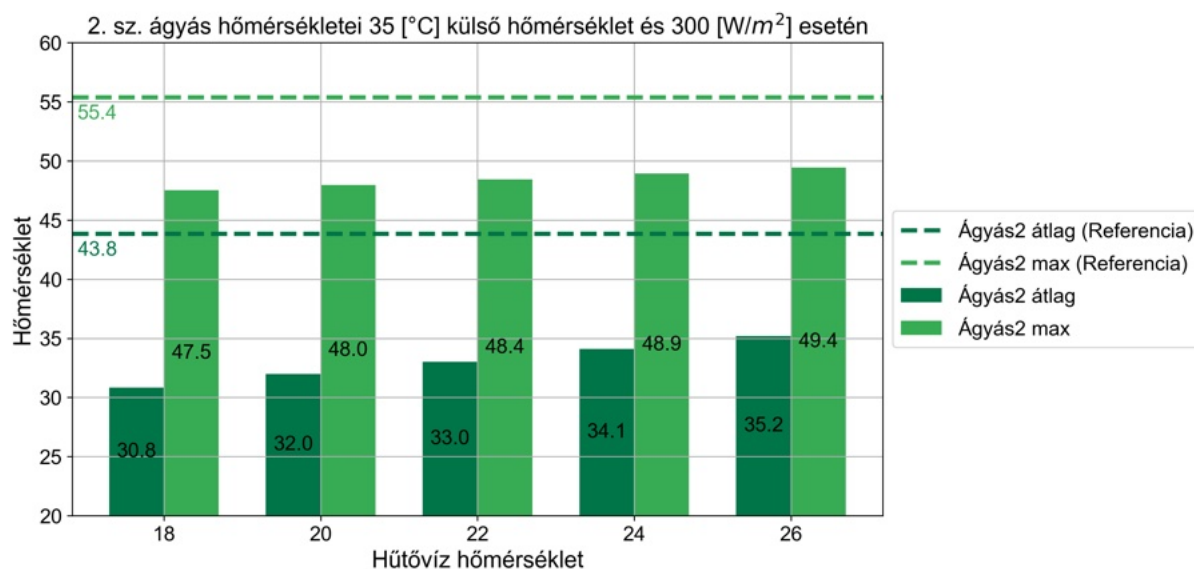


5.11. ábra: Üvegház légtér hőmérséklet eloszlása 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett referenciavizsgálat során. [saját munka]

5.4.2. Eredmények 35 [°C] külső hőmérsékletű modellek esetében

A 35 [°C] külső hőmérsékletű modellek adataiból készült, a leírásból kimaradt diagramok a 12.6.2. mellékletben találhatók.

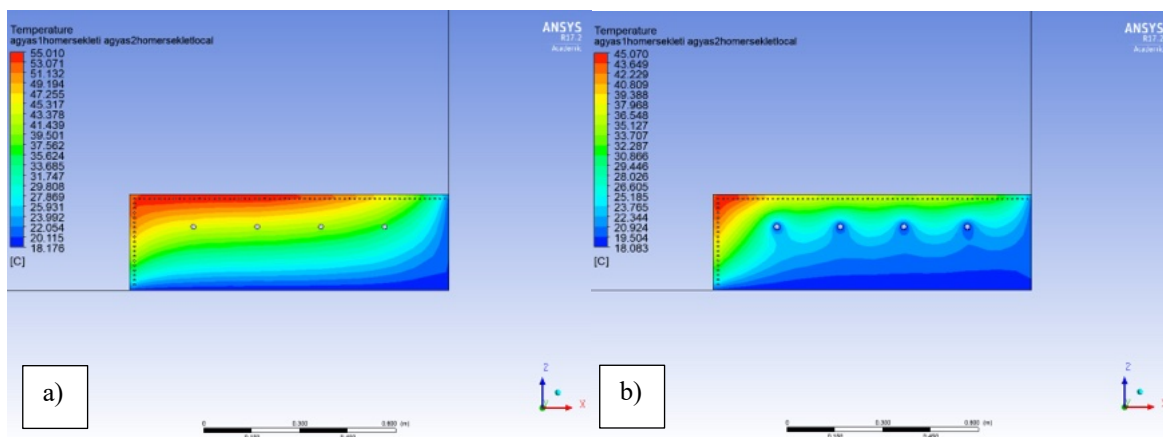
Az előző csoporthoz hasonlóan ebben az esetben is az ágyás2 és a légtér adatait mutatom be példaként. A megadott paraméterek mellett az ágyás hőmérsékletek összehasonlításához a 300 [W/m²]-hez tartozó modell eredményeiből készült diagramot mutatom be az 5.12. ábrán.



5.12. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

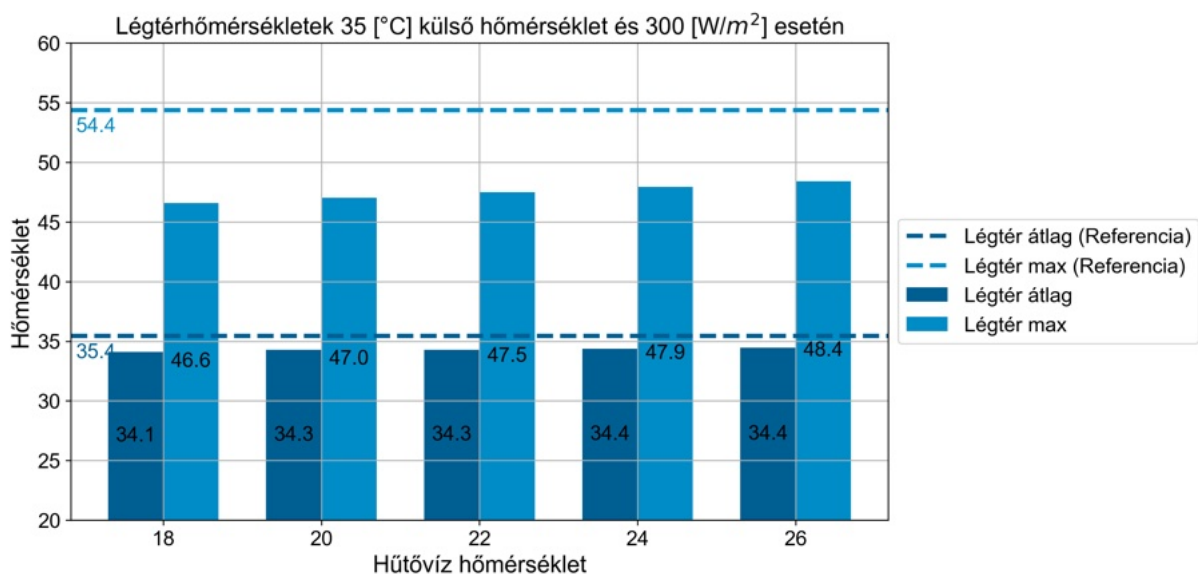
A diagramon jól látható, hogy az ágyás átlaghőmérsékletét a referenciaértékhez képest 8-13 [°C]-al, a maximum hőmérsékletet pedig 6-8 [°C]-al csökkentette a hűtőcsövek alkalmazása.

A megadott paraméterek melletti hőmérséklet eloszlásokat az 5.13. ábra mutatja be.



5.13. ábra: Hőmérsékletek alakulása az ágyásokban 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²]-es domináns napsugárzás mellett **a)** Ágyás2 referencia **b)** Ágyás2 18 [°C]-os hűtőcsövekkel [saját munka]

Az ágyás mintájára készült léghőmérsékleti diagram az 5.14. ábrán látható.



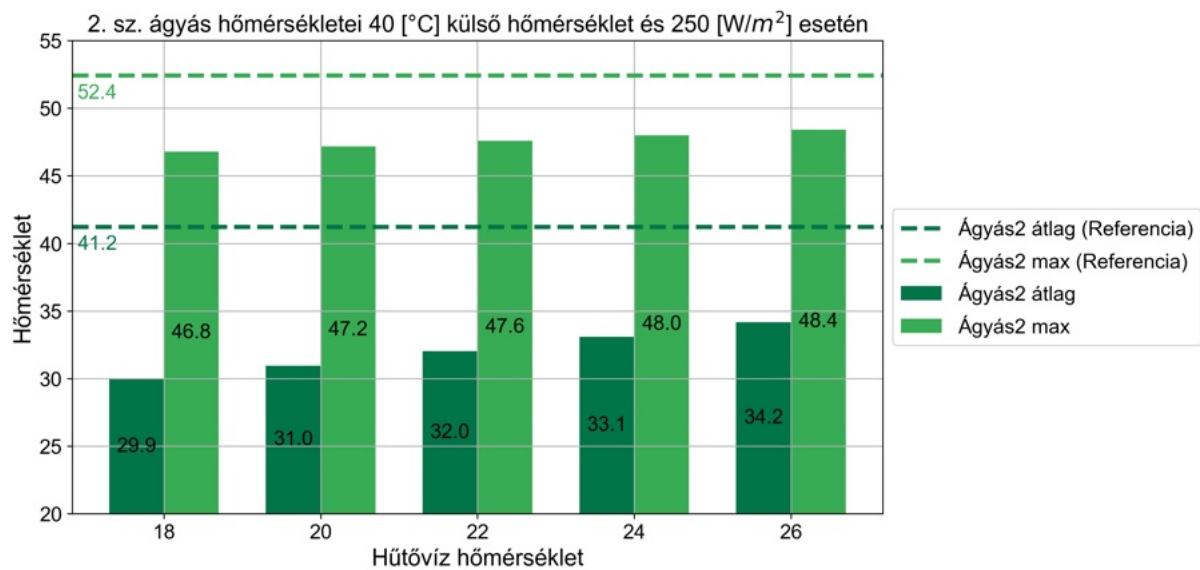
5.14. ábra: Léghőmérsékletek 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

A Léghőmérsékletek összehasonlító ábráján (5.14.) jól látható, hogy az átlaghőmérsékletre ebben az esetben sincs jelentős befolyással a bemutatott hűtési rendszer, a maximum hőmérsékletet azonban 6-8 [°C]-ot képes moderálni. Az üvegház légtérének hőmérsékleti képének bemutatásától eltekintek, jellegében minden esetben az 5.11. ábra szerinti eloszlás jelentkezett, a differencia csupán a hőmérséklet határookban módosult.

5.4.3. Eredmények 40 [°C] külső hőmérsékletű modellek esetében

A 40 [°C] külső hőmérsékletű modellek adataiból készült, a leírásból kimaradt diagramok a 12.6.3. mellékletben találhatók.

Az előző csoporthoz hasonlóan ebben az esetben is az ágyás² és a légtér adatait mutatom be példaként. A megadott paraméterek mellett az ágyás hőmérsékletek összehasonlításához a 300 [W/m²]-hez tartozó modell eredményeiből készült diagramot mutatom be az 5.15. ábrán.

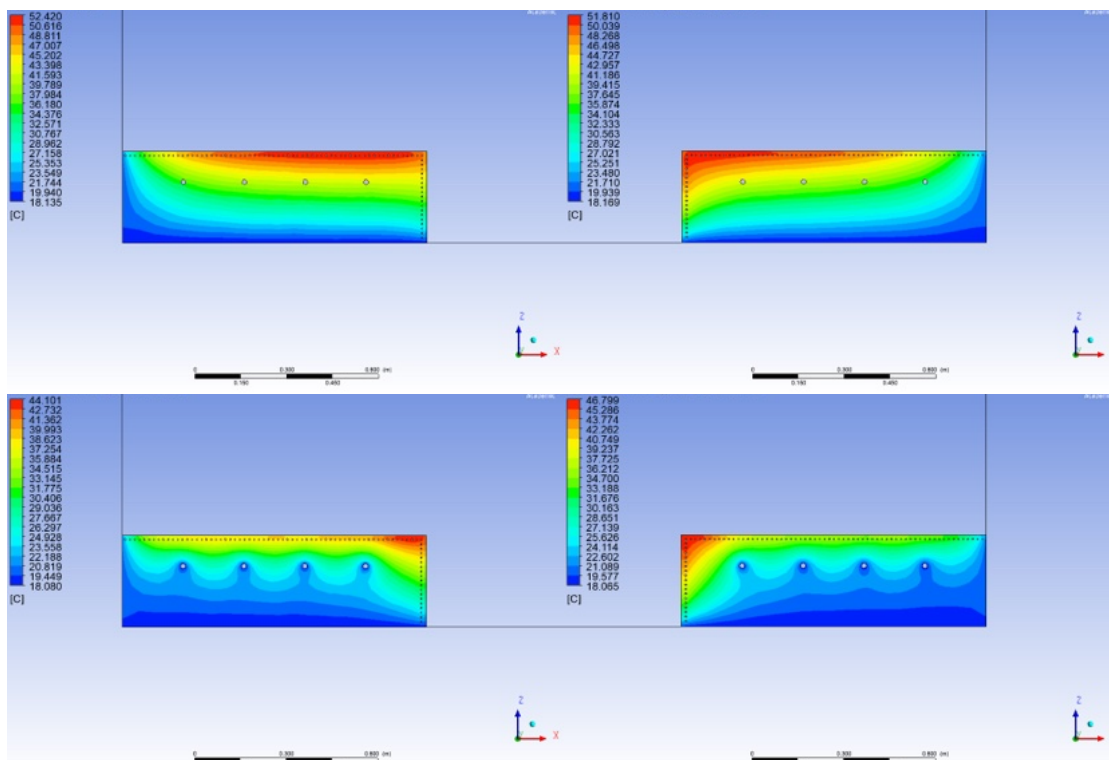


5.15. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

A diagramon jól látható, hogy az ágyás átlaghőmérsékletét a referenciaértékhez képest 7-11 [°C]-al, a maximum hőmérsékletet pedig 4-6 [°C]-al csökkentette a hűtőcsövek alkalmazása.

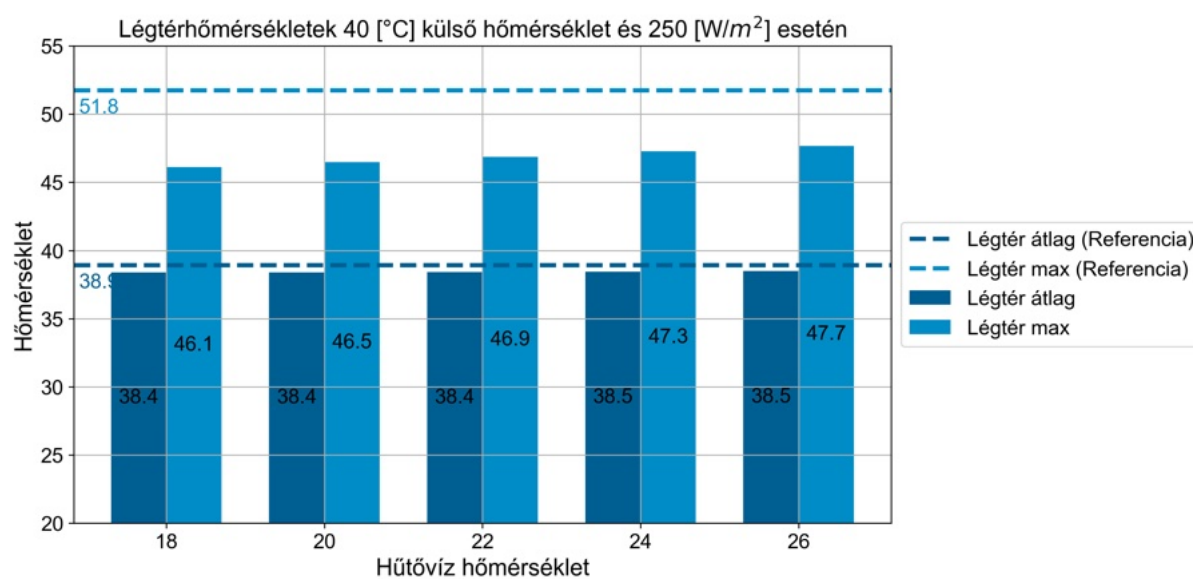
A megadott paraméterek melletti hőmérséklet eloszlásokat az 5.16. ábra mutatja be.

Ezen az ábracsoporton is jól látható, ahogy a hűtőcsövek aktív alkalmazása esetén a talaj átmelegedését jelentősen képes lokalizálni a külső felületekre.



5.16. ábra: Hőmérsékletek alakulása az ágyásokban 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²]-es domináns napsugárzás mellett **a)** Ágyás1 referencia **b)** Ágyás2 referencia **c)** Ágyás1 18 [°C]-os hűtőcsövekkel **d)** Ágyás2 18 [°C]-os hűtőcsövekkel [saját munka]

Az ágyás mintájára készült léghőmérsékleti diagram az 5.17. ábrán látható.

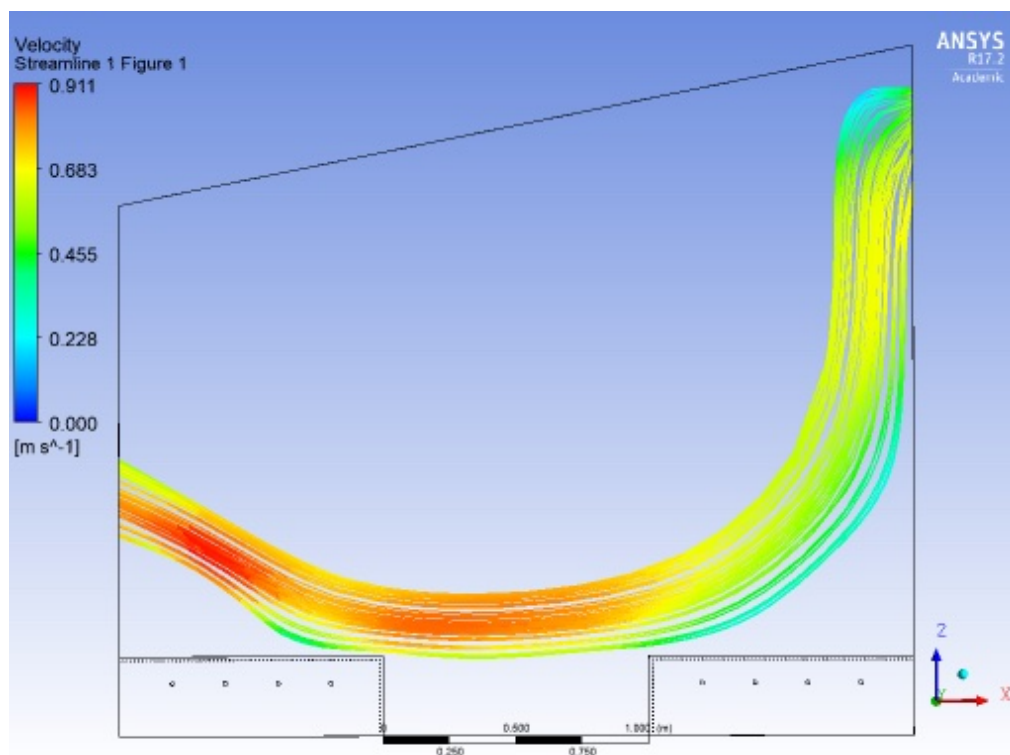


5.17. ábra: Léghőmérsékletek 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

A Léghőmérsékletek összehasonlító ábráján (5.17.) jól látható, hogy az átlaghőmérsékletre ebben az esetben sincs jelentős befolyással a bemutatott hűtési rendszer, a maximum hőmérséklet azonban 4-6 [°C]-ot képes moderálni. Az üvegház légterének hőmérsékleti képének bemutatásától eltekintek, jellegében minden esetben az 5.11. ábra szerinti eloszlás jelentkezett, a differencia csupán a hőmérséklet határookban módosult.

5.5. VEM eredmények összegzése

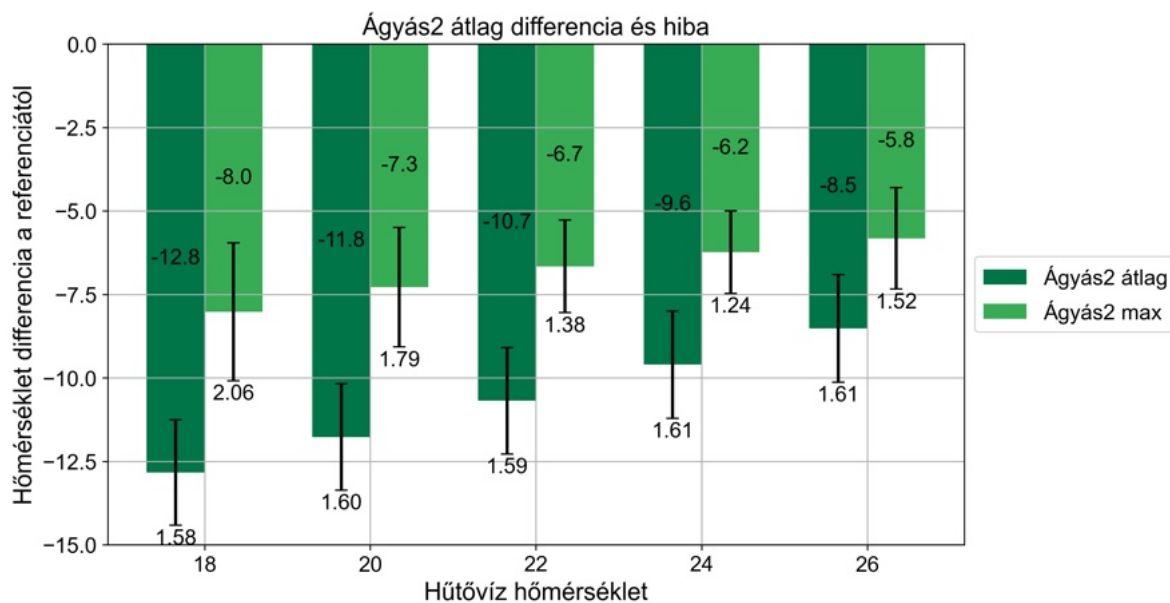
Az előző alfejezetekben, valamint a mellékletként csatolt számszerű adatok, az abból számított és generált diagramok alapján a VEM szimulációk rövid összefoglalását az áramlást bemutató 5.18. ábrával kezdem. Jellegében az ábra nem változott, csupán szűk skálán belül változtak a sebességek.



5.18. ábra: Légáramlási ábra 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett, referencia modell esetén [saját munka]

Jól látható, hogy a légáramlás a korábban bemutatott hőtérképek szerint a felforrósodásnak leginkább kitett ágyás felületek mellett áramlik, így a sugárzásból megjelenő hőmérséklet normalizálásában is szerepet vállal.

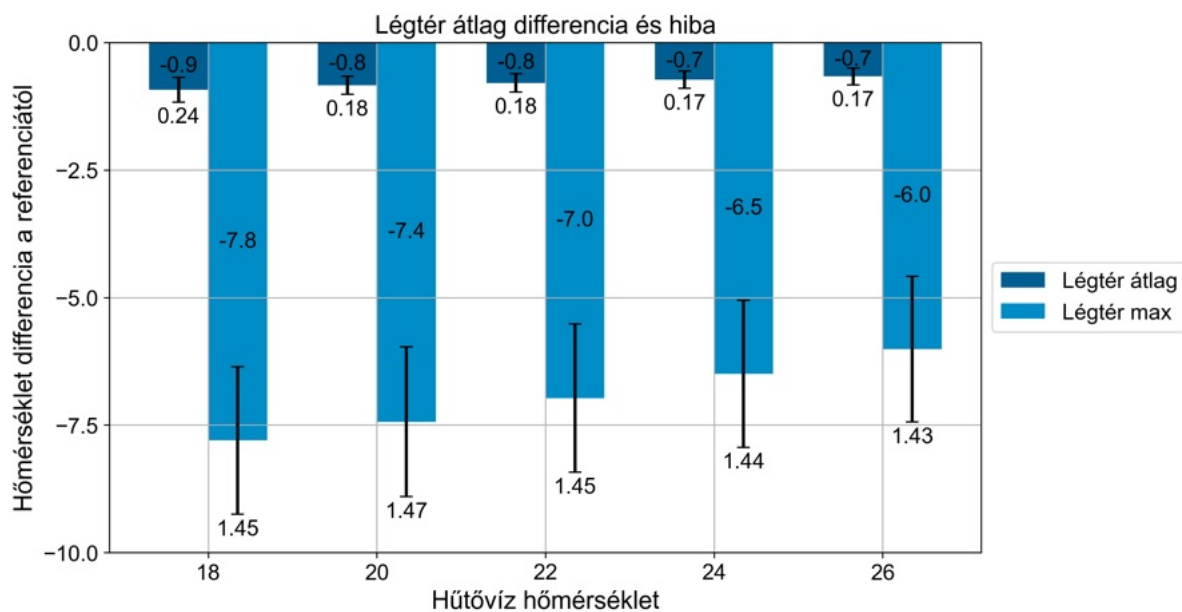
A felvázolt műszaki megoldás végső soron az üvegház növénykultúrájának gyökérszóna hűtésére szolgál. Ennek okán az 5.19. ábrán az átlagos eltérés értékek láthatók a referencia modellekhez képest a 2. sz. ágyás tekintetében.



5.19. ábra: Ágyás2 átlag differenciája a referenciához viszonyítva és a hiba. [saját munka]

Az ábrán jól látható, hogy a legkedvezőtlenebb esetben is a modell alapján $8,5 \pm 1,61$ [°C]-os átlaghőmérséklet csökkenés várható az ágyást tekintve.

A diagramot a légtérre vonatkozóan is elkészítettem, amely az 5.20. ábrán látható.



5.20. ábra: Üvegház légtér átlag differenciája a referenciához viszonyítva és a hiba.

[saját munka]

Az ábrán látható, hogy a megoldásnak a légtér átlag hőmérsékletére nincs jelentős hatása, ugyanakkor a maximális megjelenő hőmérsékletet kedvezően befolyásolja.

A hőmérséklet eloszlásokra az 5.9. és az 5.16. ábra nagyon jó példát mutat, ahol látszanak a hűtőcsövek jelentős hatásai az ágyást tekintve.

A fent bemutatott vizsgálatok mellett a legkedvezőtlenebb időszakban a szellőzés helyett mesterséges szellőztetés segítségével történő hűtési megoldást is modelleztem hűtőcsövek működésével és nélküle is. Az eredményeket az 5.1. táblázat tartalmazza

5.1. táblázat: Eredmény kiegészítés szellőztetési modellekkel. 40 [°C] küldő hőmérséklet, 350 [W] domináns sugárzás és 26 [°C] hűtővíz esetén (40_350_26) [saját munka]

Modell:	Levegő ki átl.	Ágyás1 átlag	Ágyás2 átlag	Légtér átlag	Ágyás1 max	Ágyás2 max	Légtér max
alapmodell	39,581	37,559	37,502	38,939	53,041	54,89	53,74
gyökérhűtés nélkül, ventilátorral [8 m/s]	39,82	41,298	42,246	39,353	51,243	52,805	51,971
alapmodell + ventilátor [8 m/s]	39,63	35,988	36,328	39,3	48,019	49,292	48,041

Látható, hogy gyökérzóna hűtés nélkül még ventilátor alkalmazása mellett is az átlag ágyástér hőmérséklete jelentősen magasabb. Szellőztetéssel csupán a légtér maximum hőmérséklete csökkenthető.

6. Következtetések, javaslatok

Megállapítható, hogy a vizsgálatok alapján az alkalmazott műszaki megoldás az ágyások átlag hőmérsékletén legalább $8,5 \pm 1,61$ [°C]-os, a maximum hőmérsékletén pedig legalább $5,8 \pm 1,52$ [°C]-os csökkenést eredményez.

Az általam elvégzett analitikus és VEM modellezés alapján a bemutatott műszaki megoldás további kutatása véleményem szerint indokolt. A modell hiányosságai természetesen befolyásolhatják a megoldás alkalmazhatóságát.

A további fontosabb műszaki jellegű kutatási területek a témával kapcsolatban a következők:

- modell paraméterezéseinek pontosítása (rétegrend, hőtani modellezés),
- VEM modell vizsgálat a teljes testre,
- modell pontosítása (növények, sugárzás)
- analitikus és VEM modell szinkronba helyezése (leadható hőteljesítmény, előremenő-visszatérő hőmérsékletek),
- intermittens működés figyelembe vétele, modellezése,
- berendezés valós méretezése, gyakorlati problémák kezelése (szivattyú választás, víztisztítás),
- modell validálás.

A fent említett műszaki kérdések mellett egyéb tudományágakkal való együttműködés is szükséges. Pár példa a felmerülő kérdésekre:

- algásodás vizsgálata az esővíz tárolóban,
- emelt hőmérséklet hatása a vízminőségre, különös tekintettel öntözési szemszögből,
- növények lokális hőmérséklet csökkenésre adott válaszreakciói.

A fent említett vizsgálatok lefolytatása mellett természetesen szükséges gazdasági elemzés is, mivel az érintett időszakban a növényház szektor jellemzően a karbantartásokat, kultúra váltásokat végzi. Az időszak rövidítése viszont a leírt megoldással véleményem szerint járható út lehet.

A korábban bemutatott eredmények megerősítettek, a fent említett kérdések pedig felkeltették a figyelmemet, így a jövőben további vizsgálatokat fogok folytatni a témában.

7. Összefoglaló

Diplomadolgozatomban készítése során megvizsgáltam egy üvegház-esővíztároló energetikai együttműködésének lehetőségét. Az együttműködés a nyári időszakban történő üvegház túlmelegedés, valamint a növénykultúra számára hűvös öntözővíz kombinációján alapszik.

A növények gyökérzónájának hűtésével az öntözővíz felmelegíthető a kívánt hőmérsékletre. Esővíztároló közbeiktatása mellett pedig extra hő elvezethető a talaj irányába.

A munkám során a feladatot két részre bontottam. Az első felében az esővíztároló oldalfalain elnyelhető hőteljesítménnyel kalkuláltam analitikus módon, figyelembe véve különböző vízhőmérsékleteket, valamint töltöttségi fokokat. A probléma megoldásához a Fourier-egyenletet átalakítottam, így az oldalfalon történő egyenletlen hőmérséklet eloszlással is pontos számítást tudtam végezni.

A munka második felében az üvegház CAD modelljének megalkotása után VEM szimulációkat futtattam a hő- és áramlástan adatok megismerése érdekében. Az 56 db modell futtatása során kapott adatokat feldolgoztam, a hozzávetőleges működési paramétereket bemutattam.

A műszaki megoldás a fenti modellek alapján Az ágyások átlag hőmérsékletén legalább $8,5 \pm 1,61$ [°C]-os, a maximum hőmérsékletén pedig legalább $5,8 \pm 1,52$ [°C]-os csökkenést eredményez.

8. Summary

In this thesis, I examined the possibility of energy cooperation between a greenhouse and rainwater storage. The cooperation is based on the combination of overheating of the greenhouse during the summer and cool down the irrigation water for the plants.

By cooling the root zone of the plants, the irrigation water can be heated to the desired temperature. With the installation of an underground rainwater tank, extra heat can be directed towards the ground.

During my work, I divided the task into two parts. In the first half, I calculated the amount of heat that can be absorbed on the side walls of the underwater rainwater storage tank in an analytical way, taking into account different water temperatures and degrees of filling. To solve the problem, I converted the Fourier equation, so I could perform an accurate calculation even with the uneven temperature distribution on the side wall.

In the second half of the work, after creating the CAD model of the greenhouse, I ran VEM simulations in order to get the thermal and flow data. I processed the obtained data during the running of the 56 models, and presented the approximate operating parameters.

The technical solution based on the above models results in a decrease in the average temperature of the beds of at least 8.5 ± 1.61 [°C] and in the maximum temperature of at least 5.8 ± 1.52 [°C].

9. Irodalomjegyzék

H. A. AHMED: Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review; [S. l.]: [S.n.], 2016
DOI: 10.1016/j.scienta.2016.01.030

Ansys CFX Solver Theory Guide; Canonsburg: ANSYS Inc., 2009

I. ASADI, P. SHAFIGH, Z. F. B. A. HASSAN, N. B. MAHYUDDIN: Thermal conductivity of concrete – A review; [S. l.]: Journal of Building Engineering vol.20, 2007
DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.07.002

J. BARTHOY, R. PONGRÁCZ, GY. GELYBÓ: Regional Climate Change Expected in Hungary for 2071-2100; Budapest: Applied Ecology and Environmental Research, 2007
https://www.aloki.hu/pdf/0501_001017.pdf
[hozzáférés: 2023.11.05.]

J. BEKE: Műszaki Hőtan Mérnököknek; Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 2000
ISBN: 963 356 317 8

R. BESSIN, L. H. TOWNSEND, R. G. ANDERSON: Greenhouse Insect Management; Kentucky: University of Kentucky, [S.a.]
<http://www2.ca.uky.edu/agcomm/pubs/ent/ent60/ent60.pdf>
[hozzáférés: 2023.11.05.]

S. A. BOWERS, R. J. HANKS: Specific Heat Capacity of Soils and Minerals as Determined with a Radiation Calorimeter; USA: United States Department of Agriculture (Soil Science Vol. 94, No. 6), 1962

R. A. BUCKLIN, J. D. LEARY, D. B. McCONNEL, E. G. WILKERSON: Fan and Pad Greenhouse Evaporative Cooling Systems; [S. l.]: University of Florida, 1993

- M. EDRIS, A. H. FARAH, H. EDREES, A. ALAMEEN: Impact of Foggy Cooling on the Greenhouse Microclimate; [S. l.]: Advances in BioResearch, 2019
- T. FARAGÓ, I. LÁNG, L. CSETE: Climate Change and Hungary: Mitigating the Hazard and Preparing for The Impacts; Budapest: Vahava Project, 2010
- O. T. FAROUKI: Thermal properties of soils; [S. l.]: United States Army Corps of Engineers, 1981
DOI: 10.21236/ada111734
- D.H. FLEISHER, D. TIMLIN, K. R. REDDY, Y. YANG, S. KIM: Effects of carbon dioxide and temperature on crops; [S.l.]: Imperial College Press, 2010
- A. FRANCO, D.L. VALERA, A. PEÑA: Energy Efficiency in Greenhouse Evaporative Cooling Techniques: Cooling boxes versus Cellulose Pads; [S.l.]: Energies 2014, 2014
DOI: 10.3390/en7031427
- S. GOSH: Evaporative cooling in Greenhouses; [S.l.]: Cooling India, 2019
- T. GOLDHAMMER: Greenhouse Management: A Guide to Operations and Technology; U.S.A.: Apex Publishers, 2019
ISBN: 978 0 96775212 4 4
- Greenhouse Ventillation: A key to Year-Round Gardening Success; [S.l.]: qc supply, [S.a.]
<https://www.qcsupply.com/blog/product-tips-and-how-tos/the-importance-of-ventilating-your-greenhouse.html>
[hozzáférés: 2023.11.05.]
- E. HOLCMAN, P.C. SENTELHAS: Microclimate under different shading screens in greenhouses cultivated with bromeliads; Campina Grande, Brasília: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2012
- L. HOLICS: Fizika összefoglaló; Budapest: Typotex, 1998
ISBN: 963 9132 13 6

- J. HUNTER, D. DALE, E. FIRING, M. DROETTBOOM: Matplotlib documentation (3.1.1) ;
[S.l.]: [S.n.], 2019
<https://matplotlib.org/3.1.1/Matplotlib.pdf>
[hozzáférés: 2023.11.05.]
- H. LI, S. WANG: Technology and Studies for Greenhouse Cooling; Taigu, China: Sworld
Journal of Engineering and Technology, 2015
DOI:10.4236/wjet.2015.33B012
- W. McKINNEY: Pandas documentation (1.4.4); [S.l.]: [S.n.], 2020
<https://pandas.pydata.org/pandas-docs/version/1.4.4/pandas.pdf>
[hozzáférés: 2023.11.05.]
- J. NAGY, L. HUZSAI, T. RÁTONYI, A. MEGYES: Talaj hőforgalmának modellezése; [S.l.]:
Földhasznosítási, Műszaki és Területfejlesztési Intézet, [S. a.]
<https://www.slideserve.com/nascha/f-ldhasznos-t-si-m-szaki-s-ter-letfejleszt-si-int-zet>
[hozzáférés: 2023.11.05.]
- Napsugárzási adatok 2013.; Budapest: Naplopó, [S.a.]
<https://www.naplopo.hu/tudastar/napsugarzasi-adatok/napsugarzasi-adatok-2013>
[hozzáférés: 2023.11.05.]
- Numpy documentation (1.18.4); [S.l.]: [S.n.], 2020
<https://numpy.org/doc/1.18/numpy-user.pdf>
[hozzáférés: 2023.11.05.]
- N. O'CONNOR, K. MEHTA: Modes of greenhouse water savings; Massachusetts, USA:
Procedia Engineering 159, 2016
- S- PARK, J. MOON, J. K. KIM, S. KIM: Development of Fog Cooling Control System and
Cooling Effect in Greenhouse; [S.l.]: [S.n.], 2020
DOI: 10.12791/ksbec.2020.29.3.265

SciPy documentation (1.3.0); [S.l.]: [S.n.], 2019

<https://docs.scipy.org/doc/scipy-1.3.0/scipy-ref-1.3.0.pdf>

[hozzáférés: 2023.11.05.]

Shade Systems / Energy Curtains; [S.l.]: [S.n.], [S.a.]

<https://www.stuppy.com/shade-systems/>

[hozzáférés: 2023.11.05.]

Soil Bulk Density / Moisture / Aeration; Missouri: United States Department of Agriculture, [S.a.]

<https://cafnr.missouri.edu/wp-content/uploads/2016/09/bulk-density-moisture-aeration.pdf>

[hozzáférés: 2023.11.05.]

Szimulált történelmi éghajlati és időjárási adatok Budapest; [S.l.]: meteoblue, [S.a.]

https://www.meteoblue.com/hu/időjárás/historyclimate/climatemodelled/budapest_magyarország_3054643

[hozzáférés: 2023.11.05.]

S. K. THOMAS: Heat Transfer Textbook; Dayton: Wright State University, 2008

A. WAHID, S. GELANI, M. ASHRAF, M.R. FOOLAD: Heat tolerance in plants: An overview; [S.l.]: Environmental and Experimental Botany 61, 2007

http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/Heat-tolerance-in-plants-An-overview.pdf

[hozzáférés: 2023.11.05.]

Why evaporative air cooling system; [S.l.]: Evapoler, [S.a.]

<https://www.evapoler.com/why-evaporative-air-cooler-cooling-system/#1574770583478-54528e32-a69e>

[hozzáférés: 2023.11.05.]

Yield gap and sustainable cropping systems Proceedingsi, of the NOVA Crop Science Course
2015; Helsinki, Finland: University of Helsinki, 2015
ISBN: 978-951-51-0143-3

YOUSSEF, YAKOUT, DOAA, M. MOSTAFA: Improving Performance of the Evaporative
Cooling System inside the Greenhouses and Its Effect on Tomato Productivity; [S.l.]:
Alexandria Science Exchange Journal, VOL.36, 2015
https://asejaiqjsae.journals.ekb.eg/article_2742_454f3e5da24641ffa4a30dc44be7e3f0.pdf
f
[hozzáférés: 2023.11.05.]

Y. J. ZHANG, S. ZHAO, A. DAI, P. WANG, Z. LIU, B. LIANG, T. DING: Greenhouse Natural
Ventillation Models; [S.l]: [S.n], 2022
DOI: 10.3390/agronomy12091995

10. Ábra- és táblázat jegyzék

Ábrajegyzék:

1.1. ábra: Jellemző természetes szellőztetési kialakítások növényházak esetén.	7
1.2. ábra: Jellemző gépi szellőztetés kialakítás	9
1.3. ábra: Az evaporatív hűtés működése	12
1.4. ábra: Jellemző pad and fan hűtési rendszer kialakítás	13
1.5. ábra: Jellemző köd/pára rendszer kialakítás	14
1.6. ábra: Külső nedves árnyékolókendők a tető párologtatós rendszerrel kombinálva.	16
1.7. ábra: Üvegházi árnyékolás a gyakorlatban	18
2.1. ábra: A tervezett helyszín (1172, Budapest) , valamint a telken belüli elhelyezkedés.	20
2.2. ábra: Átlagos hőmérséklet és csapadékmennyiség a helyszínen.	21
2.3. ábra: Maximum hőmérsékletek a helyszínen	21
2.4. ábra: Napsugárzás napi értékei a helyszínen	23
2.5. ábra: A talajhőmérséklet havi középértékei	23
2.6. ábra: Az üvegház-esővíztároló egyszerűsített modellje és főbb méretei	24
4.1. ábra: Egyrétegű síkfal hővezetési modellje	27
4.2. ábra: Az általam írt kód részlete és a Spyder IDE környezet	28
4.3. ábra: Az esővíztároló fala mentén alkalmazott interpolált hőmérséklet görbe	32
4.4. ábra: Tároló falán elnyelethető hőteljesítmény vízhőmérsékletenként különböző töltöttségi fokok esetén.	33
4.5. ábra: A padló hőleadás dominanciája	35
5.1. ábra: A modell főbb méretei és elemei	37
5.2. ábra: Paraméterezés érdekében történt szétválasztott felületek	38
5.3. ábra: A létrehozott napsugárzást imitáló abszorber felületek (furatok)	39
5.4. ábra: A DesignModeler-ben létrehozott felületek/felületcsoportok	40

5.5. ábra: Az összes geometria hálózása	41
5.6. ábra: A hálózás a furatok közelében	41
5.7. ábra: Vizsgálati struktúra	43
5.8. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	45
5.9. ábra: Hőmérsékletek alakulása az ágyásokban 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²]-es domináns napsugárzás mellett a) Ágyás1 referencia b) Ágyás2 referencia c) Ágyás1 18 [°C]-os hűtőcsövekkel d) Ágyás2 18 [°C]-os hűtőcsövekkel	46
5.10. ábra: Léghőmérsékletek 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	46
5.11. ábra: Üvegház légtér hőmérséklet eloszlása 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett referenciavizsgálat során.	47
5.12. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	48
5.13. ábra: Hőmérsékletek alakulása az ágyásokban 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²]-es domináns napsugárzás mellett a) Ágyás2 referencia b) Ágyás2 18 [°C]-os hűtőcsövekkel	48
5.14. ábra: Léghőmérsékletek 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	49
5.15. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	50
5.16. ábra: Hőmérsékletek alakulása az ágyásokban 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²]-es domináns napsugárzás mellett a) Ágyás1 referencia b) Ágyás2 referencia c) Ágyás1 18 [°C]-os hűtőcsövekkel d) Ágyás2 18 [°C]-os hűtőcsövekkel	51
5.17. ábra: Léghőmérsékletek 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	51

5.18. ábra: Légáramlási ábra 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett, referencia modell esetén	52
5.19. ábra: Ágyás2 átlag differenciája a referenciához viszonyítva és a hiba.	53
5.20. ábra: Üvegház légtér átlag differenciája a referenciához viszonyítva és a hiba.	54
12.1. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	80
12.2. ábra: Légtér hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	80
12.3. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	81
12.4. ábra: Légtér hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	81
12.5. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	82
12.6. ábra: Légtér hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	82
12.7. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	83
12.8. ábra: Légtér hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	83
12.9. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	84
12.10. ábra: Légtér hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	84
12.11. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	85
12.12. ábra: Légtér hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	85

12.13. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	86
12.14. ábra: Légtér hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	86
12.15. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	87
12.16. ábra: Légtér hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	87
12.17. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	88
12.18. ábra: Légtér hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m ²] domináns napsugárzás mellett.	88

Táblázat jegyzék:

1.1. táblázat: Meglévő megoldások és jellemző paramétereik	19
2.1. táblázat: Historikus maximum hőmérséklet súlyozás augusztus hónapban a helyszínen	22
4.1. táblázat: A kódban megadott konstansok	30
4.2. táblázat: A számított eredmények az elnyelhető hőtéljesítményre	34
5.1. táblázat: Eredmény kiegészítés szellőztetési modellekkel. 40 [°C] küldő hőmérséklet, 350 [W] domináns sugárzás és 26 [°C] hűtővíz esetén (40_350_26)	54
12.1. táblázat: Analitikus modell nyers exportált adatok	72
12.2. táblázat: A megadott talaj anyagtulajdonságai	73
12.3. táblázat: Megadott peremfeltételek az üvegház test esetén	74
12.4. táblázat: Megadott peremfeltételek az ágyás testek esetén (szimmetrikus)	75
12. 5. táblázat: ANSYS modell beállítási paraméterek	76
12.6. táblázat: Számított hőmérséklet adatok [°C]	78

11. Nyilatkozatok

NYILATKOZAT

A diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Waltner Soma
A Hallgató Neptun kódja: LEVIM1
A dolgozat címe: Növényház hőtechnikai részfolyamatainak elemzése
A megjelenés éve: 2023
A konzulens intézetének neve: Műszaki intézet
A konzulens tanszékének a neve: Gépszerkezettani tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítotam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemitulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: 2023 év november hó 9 nap


Hallgató aláírása

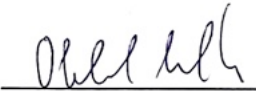
NYILATKOZAT

Waltner Soma (hallgató Neptun azonosítója: LEVIM1) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom/ nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: Gödöllő, 2023 év november hó 10 nap


belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.

12. Mellékletek

12.1. Python kód az esővíztároló leadható hőteljesítményének vizsgálatához.

```
"""
@title: Esővíztároló által leadható hőteljesítmények
@author: Soma Waltner
"""

import numpy as np
from scipy.interpolate import UnivariateSpline
from scipy.integrate import quad
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.cm as cm
import pandas as pd

# Tároló geometriai adatai m-ben megadva
magassag = 1.8
szelesseg = 4.0
vastagsag = 0.2
hossz = 3.0

# Anyag tulajdonságai
hovezetesi_tenyezo_vasbeton = 2.5 # W/mK

# Talaj hőmérséklet adatai a fal mentén
melyseg = [0.0, 0.4, 1.8, 3.5, 5.5] # A felső ponttól számított
mélység a tároló fala mentén
talaj_homersekletek = [18.0, 16.0, 14.0, 13.5, 12] # Talaj
hőmérsékletek (C fok) a megadott pontokban
viz_homersekletek = [18, 20, 22, 24, 26]
feltoltesi_szazalekok = np.arange(0.1, 1.1, 0.1)

# Interpolációs függvény a talaj hőmérséklet meghatározásához
talaj_interpolacio = UnivariateSpline(melyseg, talaj_homersekletek,
k=2, s=0.00)

# Számításhoz szükséges részegységek
A_padlo = szelesseg * hossz # padló felülete

# Adatgyűjtéshez
viz_homerseklet_gorbec = {temp: [] for temp in viz_homersekletek}
eredmenyek_xls = []

# A Fourier egyenlet függvénye
def fourier_egyenlet(A_terulet, dT, falvastagsag):
    Q_homennyiseg = (hovezetesi_tenyezo_vasbeton * A_terulet * dT) /
    falvastagsag
    return Q_homennyiseg

# Megoldás az egyes esetekhez
for viz_homerseklet in viz_homersekletek:
    for feltoltesi_szazalek in feltoltesi_szazalekok:
        # Vízszintek az interpolációhoz
        felso_vizszint = melyseg[2]*(1-feltoltesi_szazalek)
        also_vizszint = melyseg[2]
        integral, _ = quad(talaj_interpolacio, felso_vizszint,
also_vizszint)
```

```

        dT_fal = viz_homerseklet - integral / (also_vizszint -
felso_vizszint)
        dT_padlo = viz_homerseklet - talaj_homersekletek[2]
        A_fal = (2 * magassag * szelesseg + 2 * magassag *
hossz)*feltoltesi_szazalek

        Q_fal = fourier_egyenlet(A_fal, dT_fal, vastagsag)
        Q_padlo = fourier_egyenlet(A_padlo, dT_padlo, vastagsag)
        Q_teljes = Q_fal + Q_padlo

        # Adatgyűjtés
        viz_homerseklet_gorbec[viz_homerseklet].append(Q_teljes)
        eredmények_xls.append({"Víz hőmérséklet": viz_homerseklet,
                                "Feltöltés [%]": feltoltesi_szazalek *
100,
                                "Padló hőmennyiség dominancia
[%]": (Q_padlo/Q_teljes)*100 ,
                                "Q_fal [W]": Q_fal,
                                "Q_padlo [W]": Q_padlo,
                                "Q_teljes [W]": Q_teljes})

# Dataframe-be alakítás és Exportálás xls-be
eredmenyek_df = pd.DataFrame(eredmenyek_xls)
eredmenyek_df.to_excel("eredmenyek.xlsx", index=False)

# Eredmények kiírása console-ba
print(eredmenyek_df)

# Diagramok

colors = cm.Accent(np.linspace(0, 1, len(viz_homersekletek)))
plt.rc('axes', titlesize=28, labelsiz=22)
plt.rc('font', family='Arial')
plt.rcParams['legend.fontsize'] = 18

plt.figure(figsize=(8, 18), dpi=300)
plt.xlabel("Feltöltés [%]")
plt.ylabel("Padló hőleadás dominancia [%]")
plt.xlim(10,100)
plt.ylim(34,84)
plt.xticks(np.arange(10,100.1,10))
plt.yticks(np.arange(34, 84.1,2))
plt.grid(True)
plt.title("Padló hőleadás dominancia")
for i, homerseklet in enumerate(viz_homersekletek):
    adatok = [adat for adat in eredmények_xls if adat["Víz hőmérséklet"]
== homerseklet]
    feltoltes_szazalek = [adat["Feltöltés [%]"] for adat in adatok]
    padlo_dominancia = [adat["Padló hőmennyiség dominancia [%]"] for
adat in adatok]
    plt.plot(feltoltes_szazalek, padlo_dominancia, marker='o',
label=f"{homerseklet}°C", color=colors[i])
plt.legend()
plt.show()

plt.figure(figsize=(10, 10), dpi=300)
plt.xlabel("Feltöltés [%]")

```

```

plt.ylabel("Padló hőleadás dominancia [%]")
plt.xlim(50,100)
plt.ylim(34,52)
plt.xticks(np.arange(50,100.1,5))
plt.yticks(np.arange(34, 52.1,2))
plt.grid(True)
plt.title("Padló hőleadás dominancia")
for i, homerseklet in enumerate(viz_homersekletek):
    adatok = [adat for adat in eredmények_xls if adat["Víz hőmérséklet"]
== homerseklet]
    feltoltes_szazalek = [adat["Feltöltés [%]"] for adat in adatok]
    padlo_dominancia = [adat["Padló hőmennyiség dominancia [%]"] for
adat in adatok]
    plt.plot(feltoltes_szazalek, padlo_dominancia, marker='o',
label=f"{homerseklet}°C", color=colors[i])
plt.legend()
plt.show()

plt.figure(figsize=(15, 8), dpi=300)
for i, (viz_homerseklet, homenyseg_gorbe) in
enumerate(viz_homerseklet_gorbe.items()):
    plt.plot(feltoltesi_szazalekok*100, homenyseg_gorbe, marker='o',
label=f"{viz_homerseklet}°C", color=colors[i])

plt.xlabel("Feltöltés [%]")
plt.ylabel("Hőmennyiség [W]")
plt.xlim(10,100)
plt.ylim(0,6000)
plt.xticks(np.arange(10,100.1,10))
plt.yticks(np.arange(0, 6000.1,500))
plt.title("Hőmennyiség a feltöltési százalék függvényében")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

magassagok = np.linspace(0, magassag, 180)
plt.figure(figsize=(4,8), dpi=300)
plt.plot(talaj_interpolacio(magassagok), magassagok, label="Interpolált
talaj hőmérséklet")
plt.xlabel("Hőmérséklet [°C]")
plt.ylabel("Mélység [m]")
plt.gca().invert_yaxis()
plt.title("Talaj hőmérséklet eloszlás")
plt.grid(True)
plt.show()

```

12.2. Az analitikus modellezés során számított és exportált egzakt adatok.

12.1. táblázat: Analitikus modell nyers exportált adatok [saját munka]

Víz hőmérséklet	Feltöltés [%]	Padló hőteljesítmény dominancia [%]	Q_fal [W]	Q_padlo [W]	Q_teljes [W]
18	10	82,7863	124,7576245	600	724,7576245
18	20	70,85297	246,8240487	600	846,8240487
18	30	62,1189	365,8895991	600	965,8895991
18	40	55,47114	481,6435406	600	1081,643541
18	50	50,30528	592,7178463	600	1192,717846
18	60	46,34267	694,7031864	600	1294,703186
18	70	43,39503	782,6467237	600	1382,646724
18	80	41,33383	851,5956207	600	1451,595621
18	90	40,09095	896,5970387	600	1496,597039
18	100	39,66423	912,6981417	600	1512,698142
20	10	82,73902	187,7576245	900	1087,757624
20	20	70,70891	372,8240487	900	1272,824049
20	30	61,86036	554,8895991	900	1454,889599
20	40	55,09158	733,6435406	900	1633,643541
20	50	49,78653	907,7178463	900	1807,717846
20	60	45,62268	1072,703186	900	1972,703186
20	70	42,37993	1223,646724	900	2123,646724
20	80	39,90077	1355,595621	900	2255,595621
20	90	38,07756	1463,597039	900	2363,597039
20	100	36,8445	1542,698142	900	2442,698142
22	10	82,7154	250,7576245	1200	1450,757624
22	20	70,6371	498,8240487	1200	1698,824049
22	30	61,7319	743,8895991	1200	1943,889599
22	40	54,90374	985,6435406	1200	2185,643541
22	50	49,53115	1222,717846	1200	2422,717846
22	60	45,27101	1450,703186	1200	2650,703186
22	70	41,88998	1664,646724	1200	2864,646724
22	80	39,22087	1859,595621	1200	3059,595621
22	90	37,14484	2030,597039	1200	3230,597039
22	100	35,57982	2172,698142	1200	3372,698142
24	10	82,70124	313,7576245	1500	1813,757624
24	20	70,59408	624,8240487	1500	2124,824049
24	30	61,65508	932,8895991	1500	2432,889599
24	40	54,79165	1237,643541	1500	2737,643541
24	50	49,37917	1537,717846	1500	3037,717846
24	60	45,06259	1828,703186	1500	3328,703186
24	70	41,60141	2105,646724	1500	3605,646724
24	80	38,82394	2363,595621	1500	3863,595621
24	90	36,60682	2597,597039	1500	4097,597039
24	100	34,86185	2802,698142	1500	4302,698142

26	10	82,6918	376,7576245	1800	2176,757624
26	20	70,56543	750,8240487	1800	2550,824049
26	30	61,60397	1121,889599	1800	2921,889599
26	40	54,71717	1489,643541	1800	3289,643541
26	50	49,27838	1852,717846	1800	3652,717846
26	60	44,92472	2206,703186	1800	4006,703186
26	70	41,41123	2546,646724	1800	4346,646724
26	80	38,56375	2867,595621	1800	4667,595621
26	90	36,25672	3164,597039	1800	4964,597039
26	100	34,39908	3432,698142	1800	5232,698142

12.3. Megadott peremfeltételek a VEM modellben

12.2. táblázat: A megadott talaj anyagtulajdonságai [saját munka].

Megnevezés	Egység	Mértékegység
Sűrűség	1500	[kg/m ³]
Fajhő	1200	[J/kgK]
Hővezetési tényező	2,5	[W/mK]

12.3. táblázat: Megadott peremfeltételek az üvegház test esetén [saját munka]

Felület/felületcsoport neve	Megnevezés a software-ben	Megadott tulajdonság	Tulajdonság részletei
Alsó szellőző	levegő_be	Inlet	Statikus nyomás - 0 [bar] Turbulencia: Közepes – 5 [%] Külső hőmérséklet: [változó]
Felső szellőző	levegő_ki	Outlet	Statikus nyomás – 0 [bar]
Üvegház – levegő kontakt	levegő_kulso_hatar	Heat Transfer Coefficient	Hőátbocsátási tényező: 2 W/m ² K Külső hőmérséklet: [változó]
Virtuális fal	uveghaz_passziv_kontakt		-
Üvegház – Talaj k.	uveghaz_talaj_kontakt	Heat Transfer Coefficient	Hőátbocsátási tényező: 500 W/m ² K Külső hőmérséklet: 20 [°C]
Üvegház - esővíztároló k.	uveghaz_tarolo_kontakt	Heat Transfer Coefficient	Hőátbocsátási tényező: 500 W/m ² K Külső hőmérséklet: 18 [°C]
Üvegház – ágyás1 k.	Domain Interface 1		-
Üvegház – ágyás2 k.	Domain Interface 2		-

12.4. táblázat: Megadott peremfeltételek az ágyás testek esetén (szimmetrikus)
[saját munka]

Felület/felületcsoport neve	Megnevezés a software-ben	Megadott tulajdonság	Tulajdonság részletei
Hűtőcsövek	agyas1_hutocsovek (agyas2_hutocsovek)	Heat Transfer Coefficient	Hőátbocsátási tényező: 1200 W/m ² K Külső hőmérséklet: [változó]
Belső felület napsugárzás	agyas1_nap_hatas_belso (agyas2_nap_hatas_belso)	Heat Flux	Hőszugárzás: [változó]
Felső felület napsugárzás	agyas1_nap_hatas_felso (agyas1_nap_hatas_felso)	Heat Flux	Hőszugárzás: [változó]
Virtuális fal	agyas1_passziv_kontakt (agyas2_passziv_kontakt)		
Ágyás – talaj k.	agyas1_talaj_kontakt (agyas2_talaj_kontakt)	Heat Transfer Coefficient	Hőátbocsátási tényező: 500 W/m ² K Külső hőmérséklet: 20 [°C]
Ágyás – esővíztároló k.	agyas1_tarolo_kontakt (agyas2_tarolo_kontakt)	Heat Transfer Coefficient	Hőátbocsátási tényező: 500 W/m ² K Külső hőmérséklet: 18 [°C]
Ágyás – üvegház k.	Domain Interface 1 (Domain Interface 2)		

12.4. Vizsgálati struktúra.

12. 5. táblázat: ANSYS modell beállítási paraméterek [saját munka]

Sorszám	Külső hőmérséklet [°C]	Hőszugárzás: agyas1_felső [W/m ²]	Hőszugárzás: agyas1_also [W/m ²]	Hőszugárzás: agyas2_felső [W/m ²]	Hőszugárzás: agyas2_also [W/m ²]	Hűtővíz hőm. [°C]
30_250_ref	30	250	50	208	167	-
30_250_18	30	250	50	208	167	18
30_250_20	30	250	50	208	167	20
30_250_22	30	250	50	208	167	22
30_250_24	30	250	50	208	167	24
30_250_26	30	250	50	208	167	26
30_300_ref	30	300	60	250	200	-
30_300_18	30	300	60	250	200	18
30_300_20	30	300	60	250	200	20
30_300_22	30	300	60	250	200	22
30_300_24	30	300	60	250	200	24
30_300_26	30	300	60	250	200	26
30_350_ref	30	350	70	292	233	-
30_350_18	30	350	70	292	233	18
30_350_20	30	350	70	292	233	20
30_350_22	30	350	70	292	233	22
30_350_24	30	350	70	292	233	24
30_350_26	30	350	70	292	233	26
35_250_ref	35	250	50	208	167	-
35_250_18	35	250	50	208	167	18
35_250_20	35	250	50	208	167	20
35_250_22	35	250	50	208	167	22
35_250_24	35	250	50	208	167	24
35_250_26	35	250	50	208	167	26
35_300_ref	35	300	60	250	200	-
35_300_18	35	300	60	250	200	18
35_300_20	35	300	60	250	200	20
35_300_22	35	300	60	250	200	22
35_300_24	35	300	60	250	200	24
35_300_26	35	300	60	250	200	26
35_350_ref	35	350	70	292	233	-
35_350_18	35	350	70	292	233	18
35_350_20	35	350	70	292	233	20
35_350_22	35	350	70	292	233	22
35_350_24	35	350	70	292	233	24
35_350_26	35	350	70	292	233	26

40_250_ref	40	250	50	208	167	-
40_250_18	40	250	50	208	167	18
40_250_20	40	250	50	208	167	20
40_250_22	40	250	50	208	167	22
40_250_24	40	250	50	208	167	24
40_250_26	40	250	50	208	167	26
40_300_ref	40	300	60	250	200	-
40_300_18	40	300	60	250	200	18
40_300_20	40	300	60	250	200	20
40_300_22	40	300	60	250	200	22
40_300_24	40	300	60	250	200	24
40_300_26	40	300	60	250	200	26
40_350_ref	40	350	70	292	233	-
40_350_18	40	350	70	292	233	18
40_350_20	40	350	70	292	233	20
40_350_22	40	350	70	292	233	22
40_350_24	40	350	70	292	233	24
40_350_26	40	350	70	292	233	26

12.5. VEM számított eredmények

12.6. táblázat: Számított hőmérséklet adatok [°C] [saját munka]

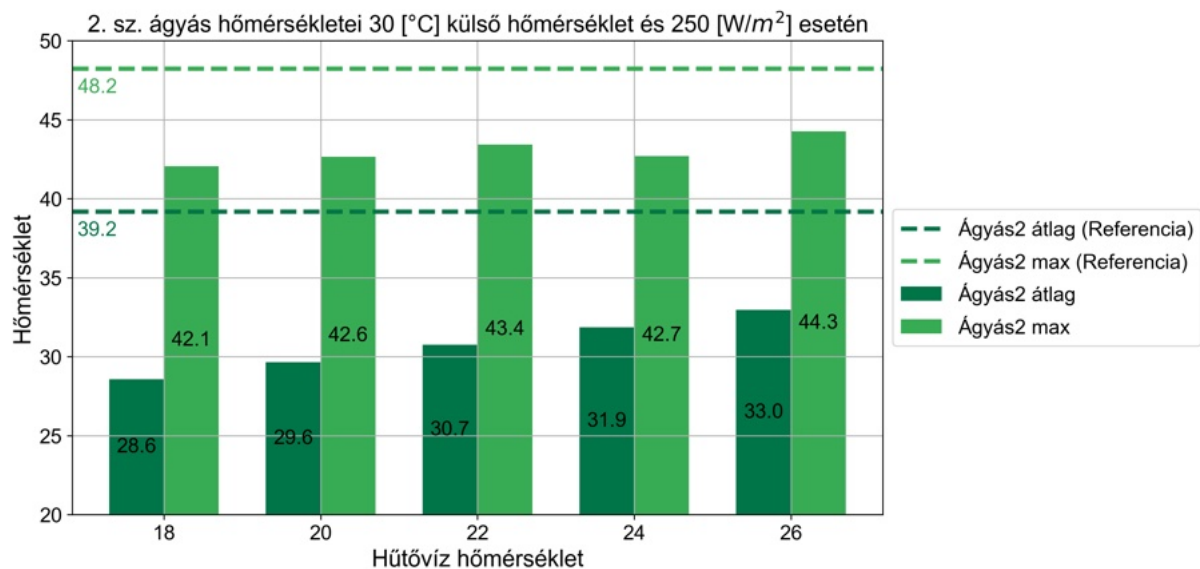
Modell:	Levegő ki átl.	Ágyás1 átlag	Ágyás2 átlag	Légtér átlag	Ágyás1 max	Ágyás2 max	Légtér max
30_250_ref	30,611	38,904	39,189	30,775	48,003	48,239	47,812
30_250_18	30,172	28,635	28,562	29,821	39,993	42,056	41,276
30_250_20	30,15	29,676	29,646	29,848	42,569	42,642	41,774
30_250_22	30,147	30,73	30,748	29,902	43,121	43,428	42,294
30_250_24	30,157	31,783	31,852	29,97	41,933	42,693	42,853
30_250_26	30,175	32,837	32,956	30,044	42,587	44,261	43,429
30_300_ref	30,436	42,682	42,93	30,941	54,029	53,987	53,328
30_300_18	29,924	30,22	30,311	29,703	42,976	43,107	45,283
30_300_20	30,171	31,375	31,401	30,055	45,768	46,18	45,172
30_300_22	30,183	32,438	32,505	30,135	45,989	46,748	45,728
30_300_24	30,198	33,5	33,611	30,216	45,374	47,333	46,32
30_300_26	30,222	34,569	34,726	30,305	46,2	46,06	46,93
30_350_ref	30,575	46,171	46,528	31,385	59,198	59,244	58,566
30_350_18	30,302	32,145	32,183	30,491	47,128	47,879	48,565
30_350_20	30,278	33,182	33,257	30,497	47,747	48,321	49,074
30_350_22	30,273	34,235	34,352	30,529	48,391	50,81	49,632
30_350_24	30,279	35,291	35,45	30,579	49,043	51,232	50,197
30_350_26	30,291	36,342	36,543	30,638	49,693	51,923	50,759
35_250_ref	34,929	40,127	40,068	34,658	49,434	50,15	49,442
35_250_18	34,658	29,39	29,098	33,761	41,691	44,065	43,321
35_250_20	34,717	30,43	30,21	33,921	42,364	44,569	43,813
35_250_22	34,743	31,456	31,298	34,011	43,122	45,042	44,272
35_250_24	34,768	32,483	32,387	34,096	43,978	45,515	44,732
35_250_26	34,791	33,51	33,473	34,176	44,231	45,989	45,189
35_300_ref	35,229	43,539	43,849	35,446	55,01	55,382	54,382
35_300_18	34,78	31,047	30,839	34,117	45,07	47,518	46,59
35_300_20	34,838	32,116	31,993	34,271	45,678	47,977	47,034
35_300_22	34,825	33,097	33,013	34,285	46,213	48,44	47,484
35_300_24	34,855	34,127	34,105	34,378	47,112	48,932	47,942
35_300_26	34,875	35,149	35,185	34,449	47,476	49,43	48,418
35_350_ref	35,174	46,433	46,914	35,34	57,988	59,633	58,961
35_350_18	35,023	32,707	32,608	34,647	48,434	50,885	49,771
35_350_20	34,99	33,692	33,634	34,644	48,986	51,304	50,168
35_350_22	34,982	34,768	34,782	34,675	49,59	51,796	50,611
35_350_24	34,985	35,75	35,802	34,701	50,476	52,287	51,091
35_350_26	34,99	36,779	36,888	34,753	50,976	52,783	51,595
40_250_ref	39,598	41,506	41,214	38,93	51,81	52,42	51,761

40_250_18	39,524	30,394	29,946	38,392	44,101	46,799	46,115
40_250_20	39,507	31,354	30,951	38,392	44,677	47,179	46,473
40_250_22	39,506	32,366	32,023	38,416	45,102	47,589	46,869
40_250_24	39,516	33,379	33,1	38,455	45,876	48,006	47,271
40_250_26	39,53	34,377	34,158	38,502	46,677	48,42	47,67
40_300_ref	39,531	45,045	45,127	39,339	55,782	57,11	57,645
40_300_18	39,406	31,973	31,6	38,441	47,252	50,131	49,262
40_300_20	39,429	32,974	32,656	38,491	47,787	50,523	49,636
40_300_22	39,459	33,979	33,721	38,552	48,351	50,023	50,023
40_300_24	39,49	34,983	34,787	38,619	49,12	51,332	50,413
40_300_26	39,521	35,991	35,858	38,691	49,744	51,742	50,808
40_350_ref	39,731	47,875	48,16	39,649	61,253	61,736	60,737
40_350_18	39,509	33,572	33,291	38,785	50,342	53,295	52,231
40_350_20	39,51	34,536	34,297	38,798	51,003	53,667	52,58
40_350_22	39,527	35,548	35,37	38,834	51,935	54,066	52,964
40_350_24	39,553	36,553	36,436	38,882	52,625	54,467	53,35
40_350_26	39,581	37,559	37,502	38,939	53,041	54,89	53,74

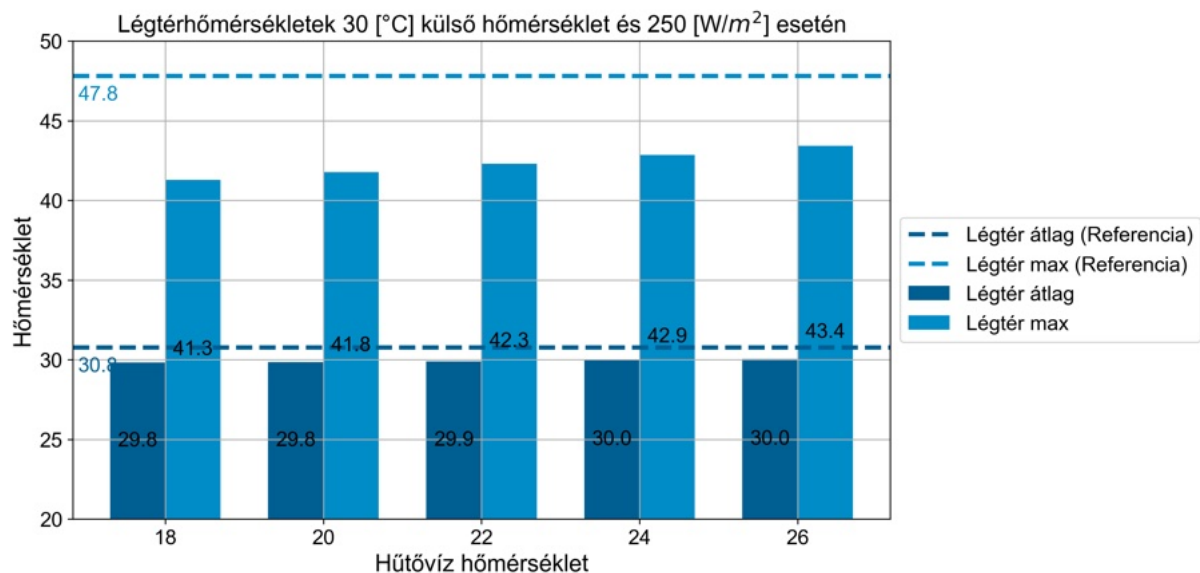
12.6. VEM diagramok

12.6.1. 30 [°C] külső hőmérséklet esetén

250 W/m² domináns sugárzás esetén

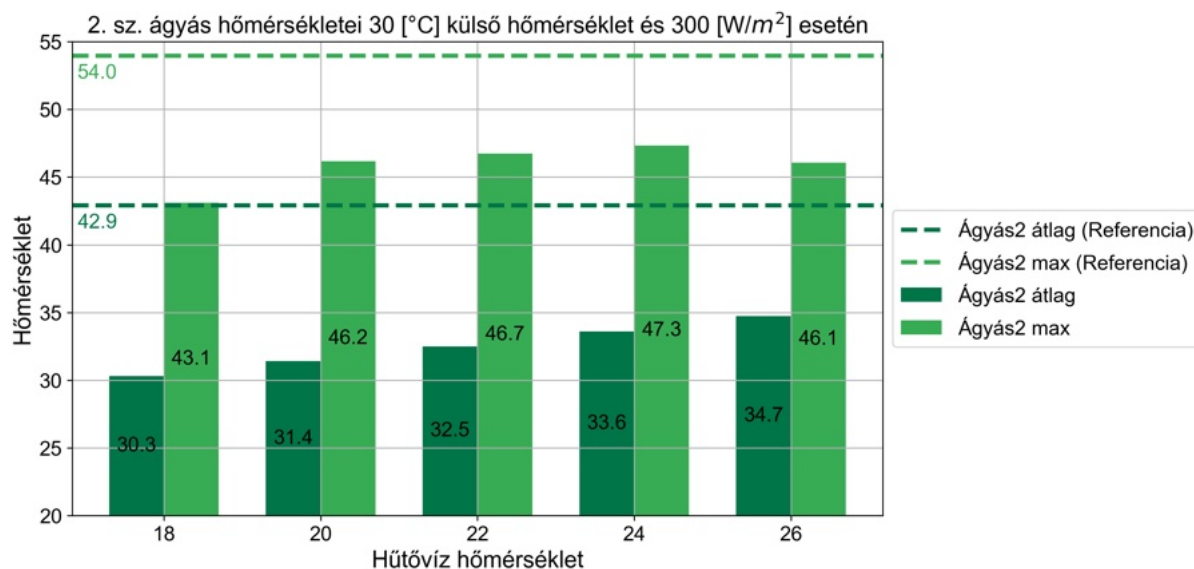


12.1. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

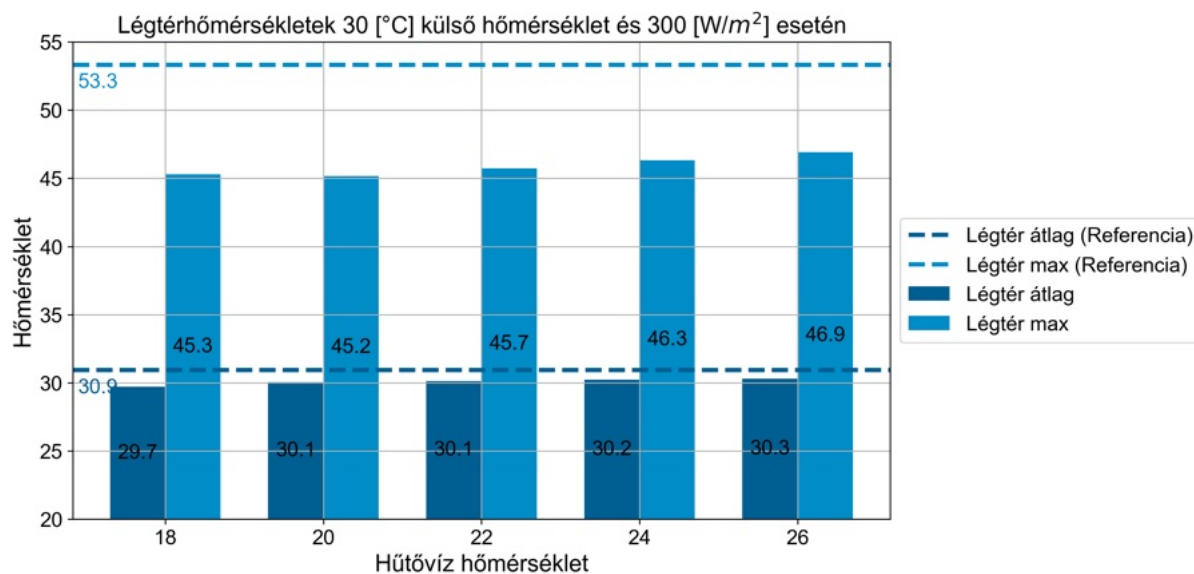


12.2. ábra: Légtér hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

300 W/m² domináns sugárzás esetén

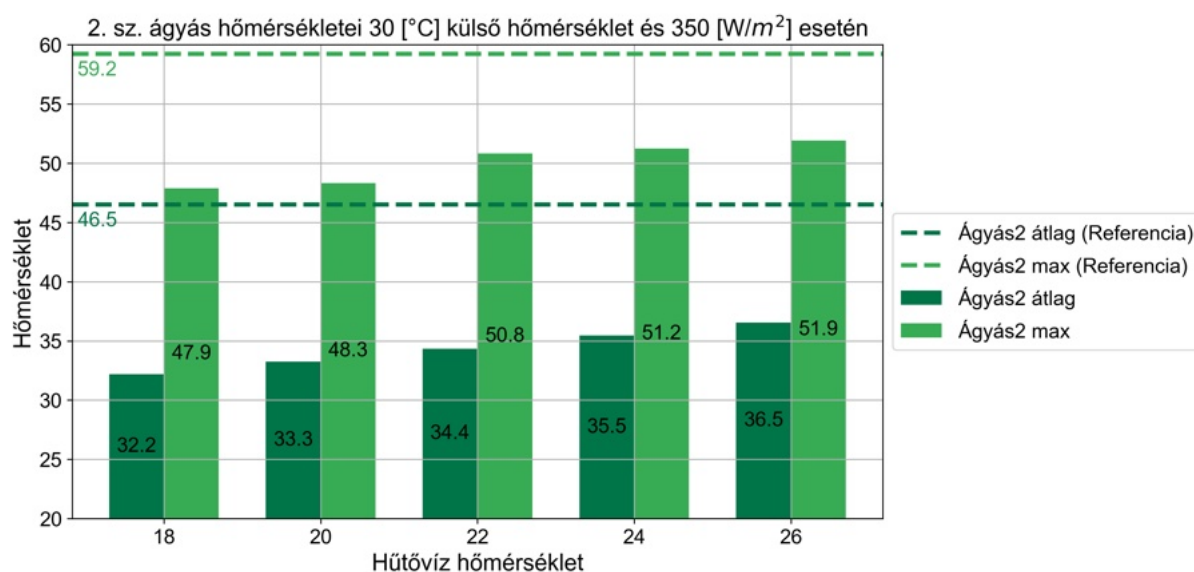


12.3. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

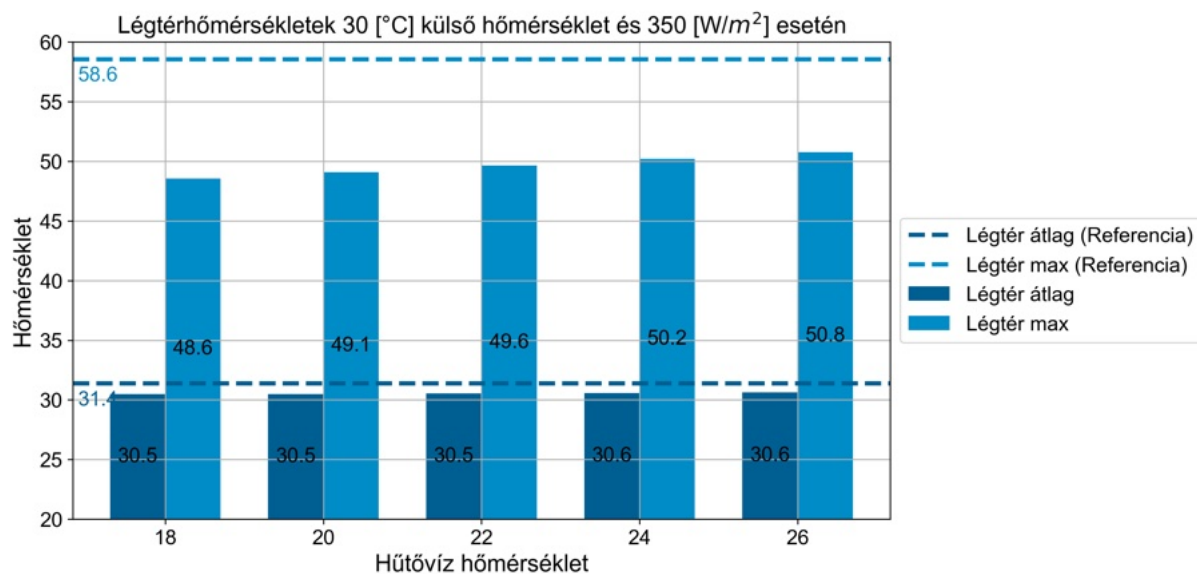


12.4. ábra: Légtér hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

350 W/m² domináns sugárzás esetén



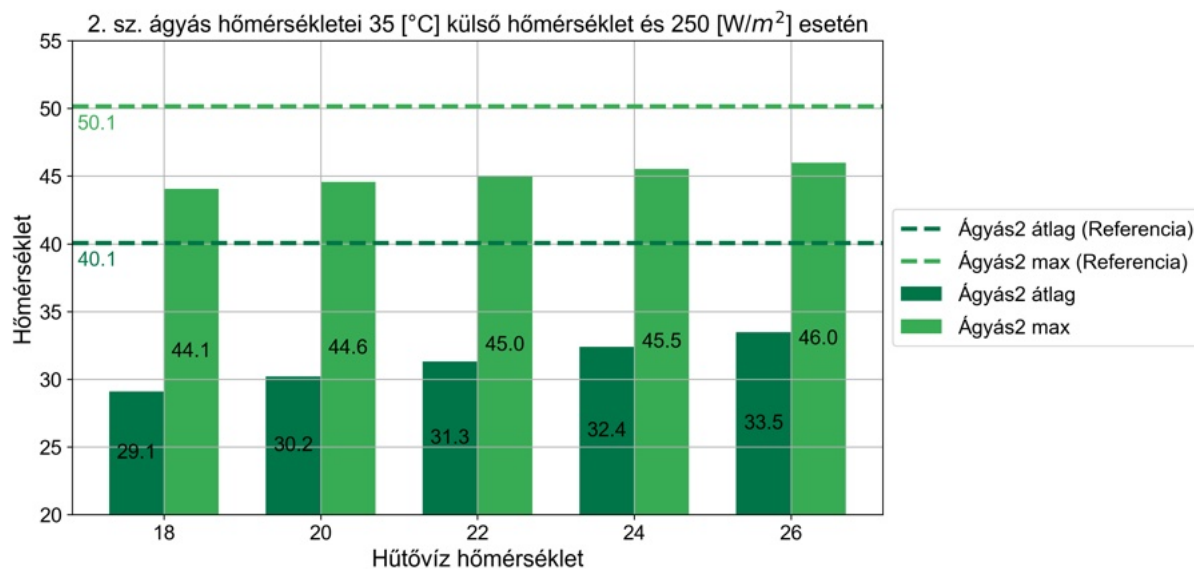
12.5. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]



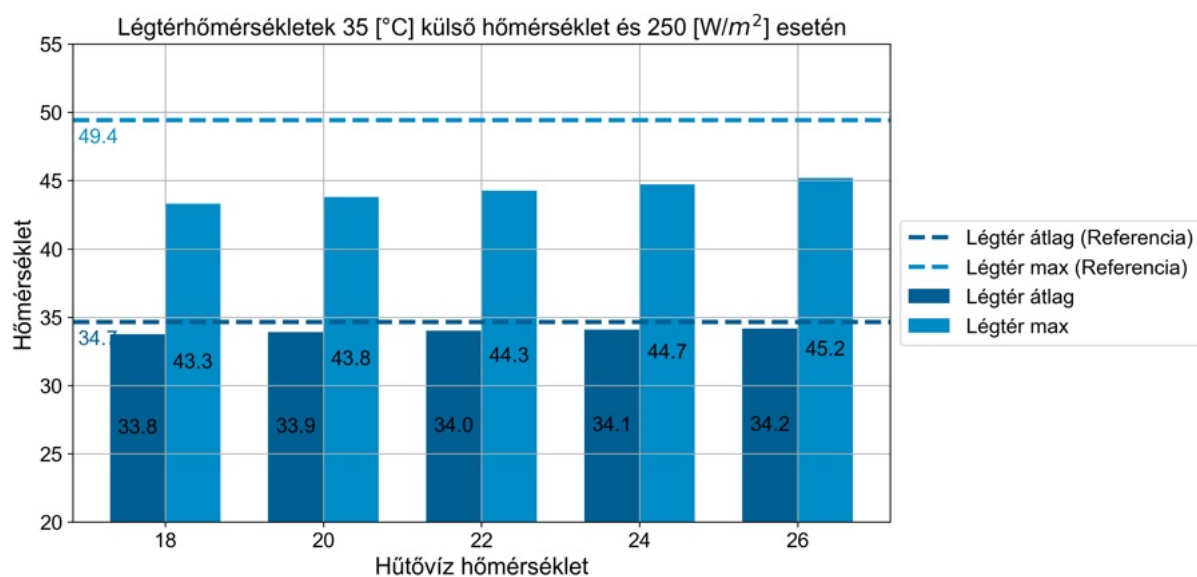
12.6. ábra: Légtér hőmérsékletei 30 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

12.6.2. 35 [°C] külső hőmérséklet esetén

250 W/m² domináns sugárzás esetén

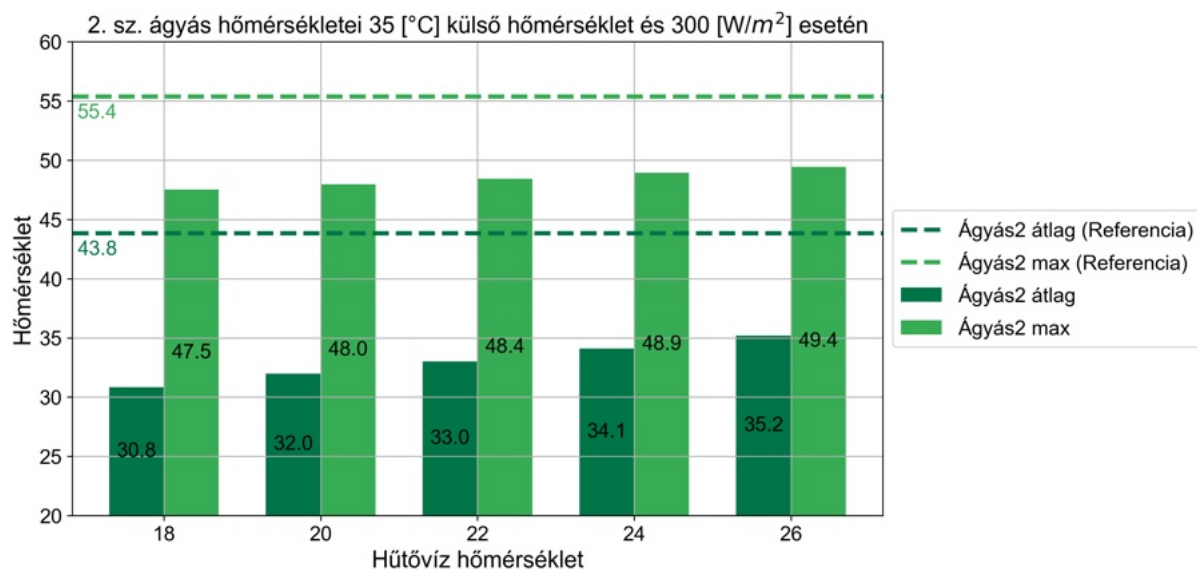


12.7. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

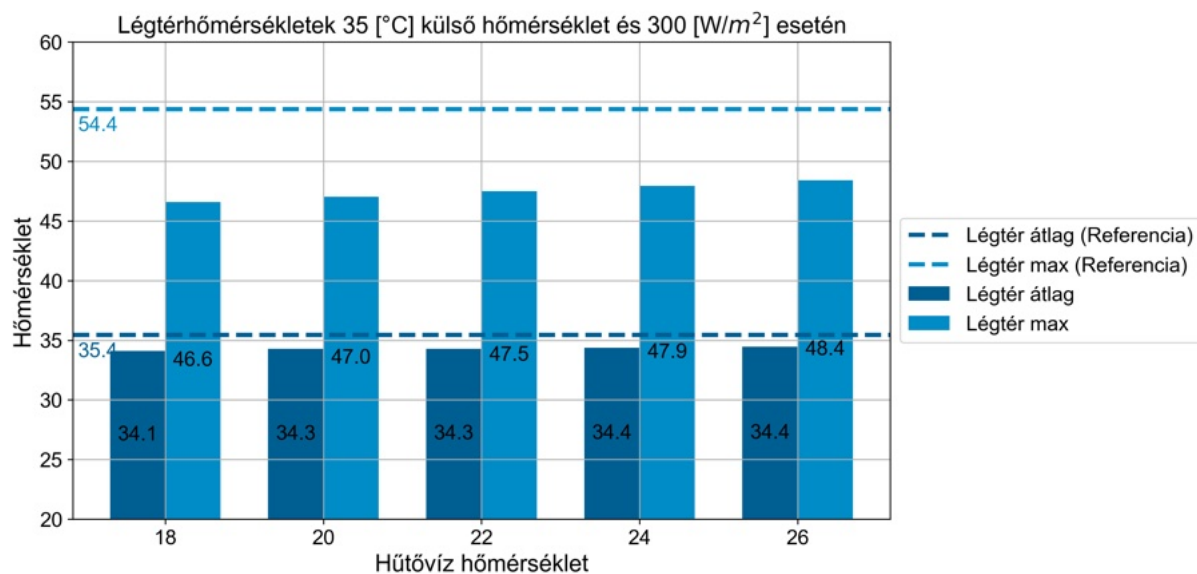


12.8. ábra: Légtér hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

300 W/m² domináns sugárzás esetén

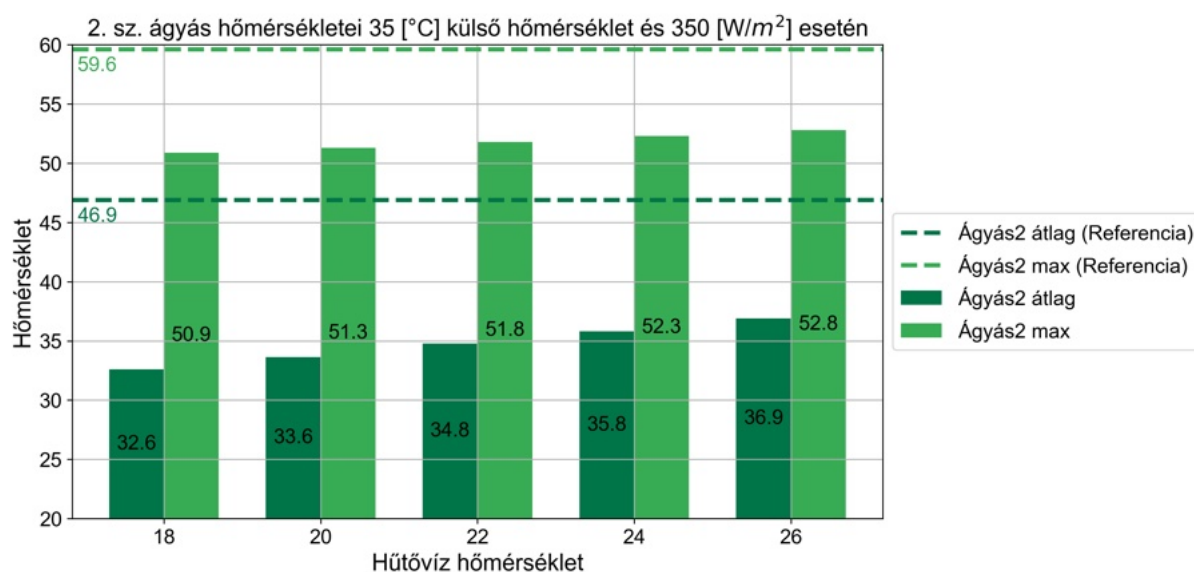


12.9. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

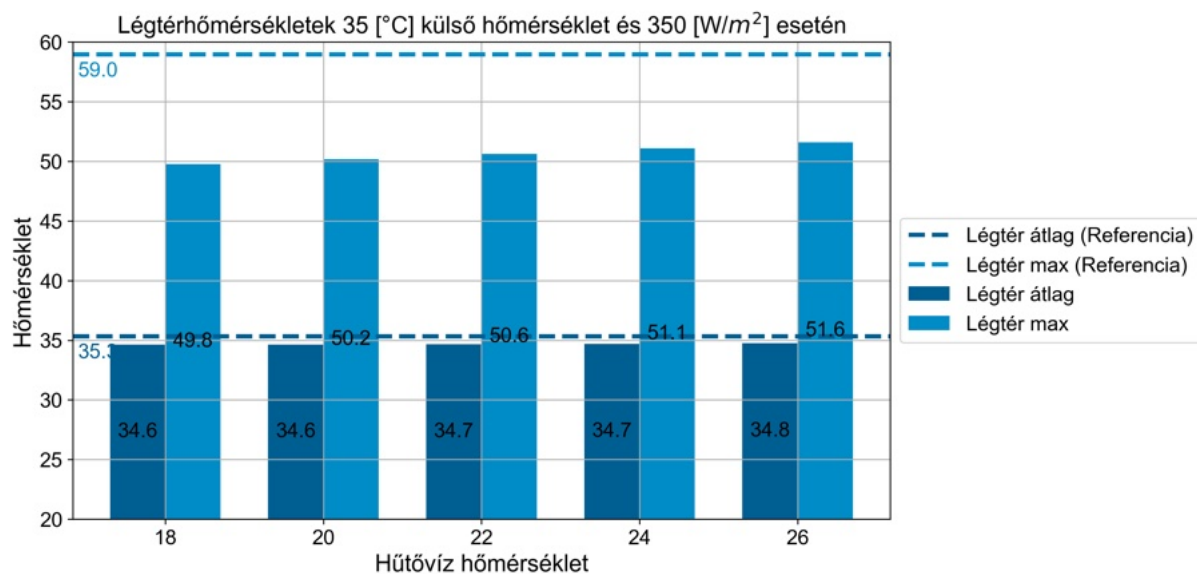


12.10. ábra: Légtér hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

350 W/m² domináns sugárzás esetén



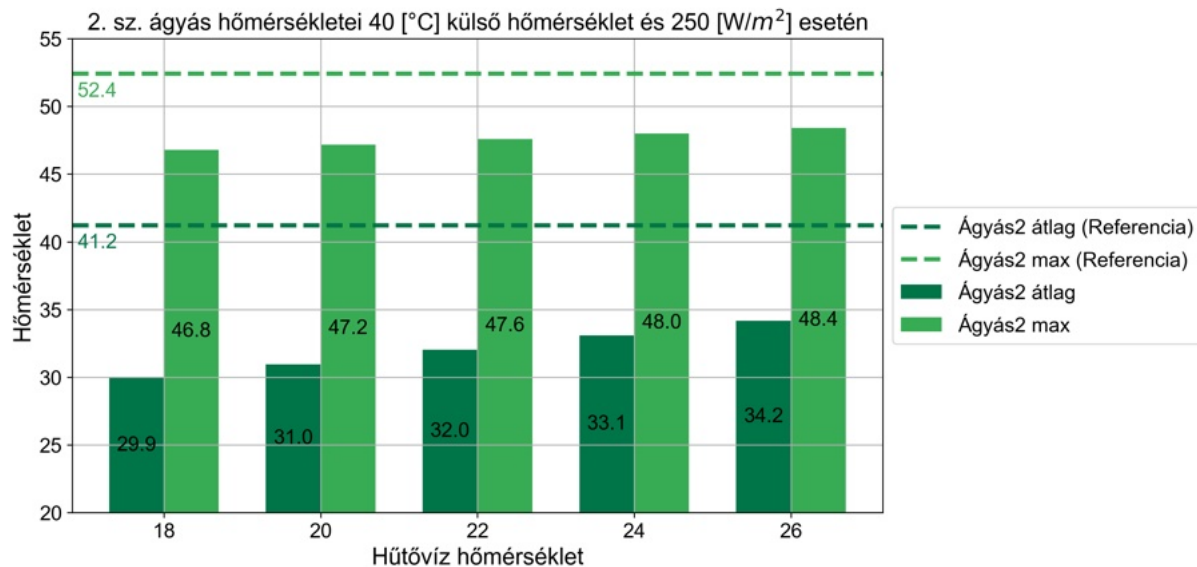
12.11. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]



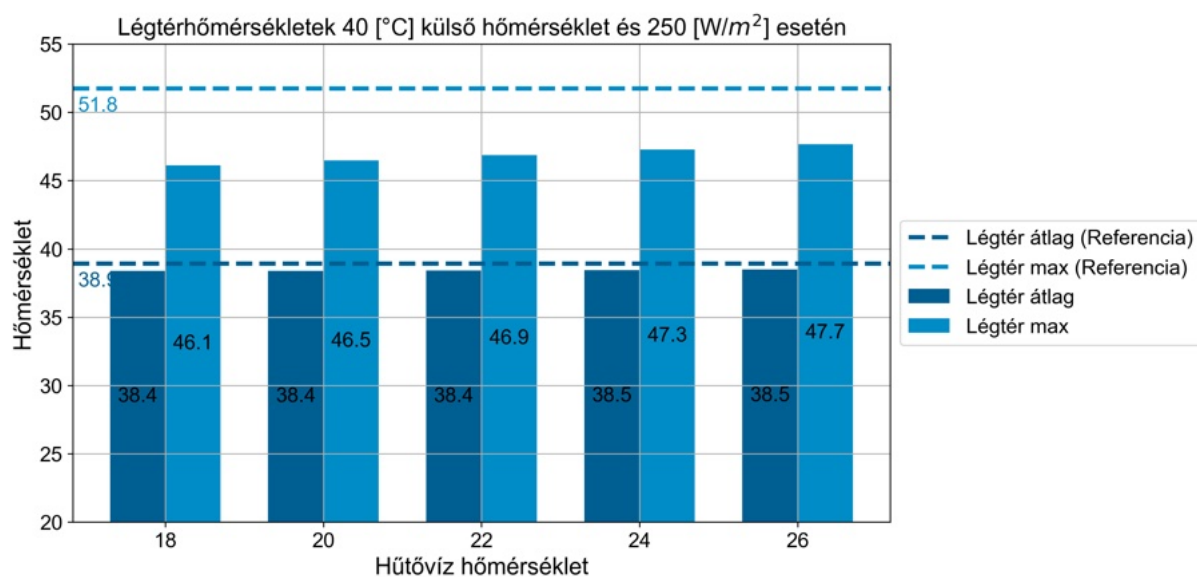
12.12. ábra: Légtér hőmérsékletei 35 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

12.6.3. 40 [°C] külső hőmérséklet esetén

250 W/m² domináns sugárzás esetén

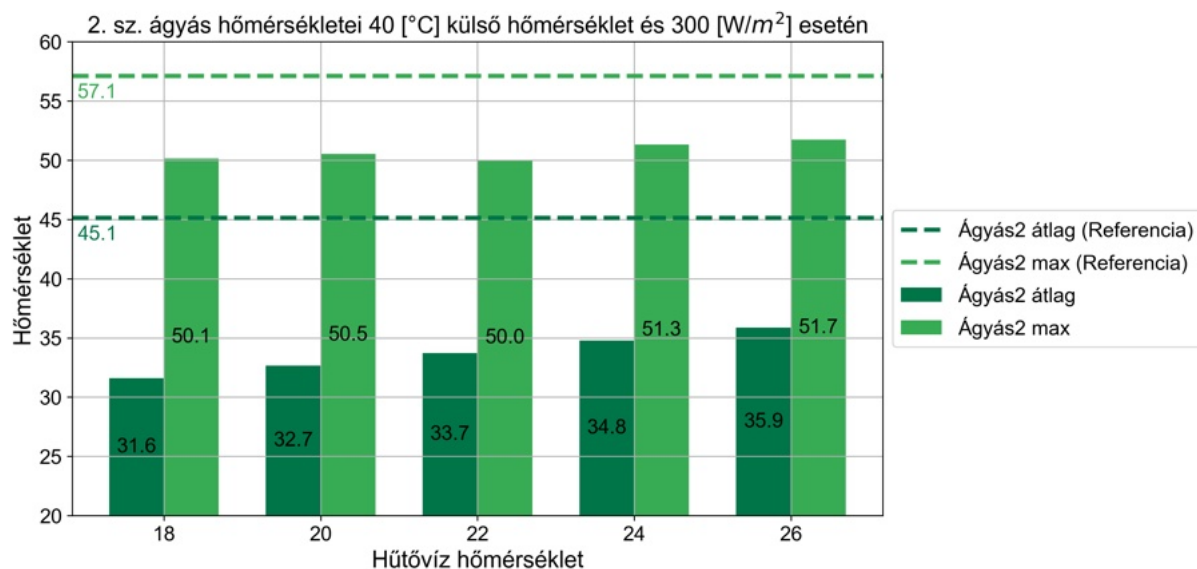


12.13. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

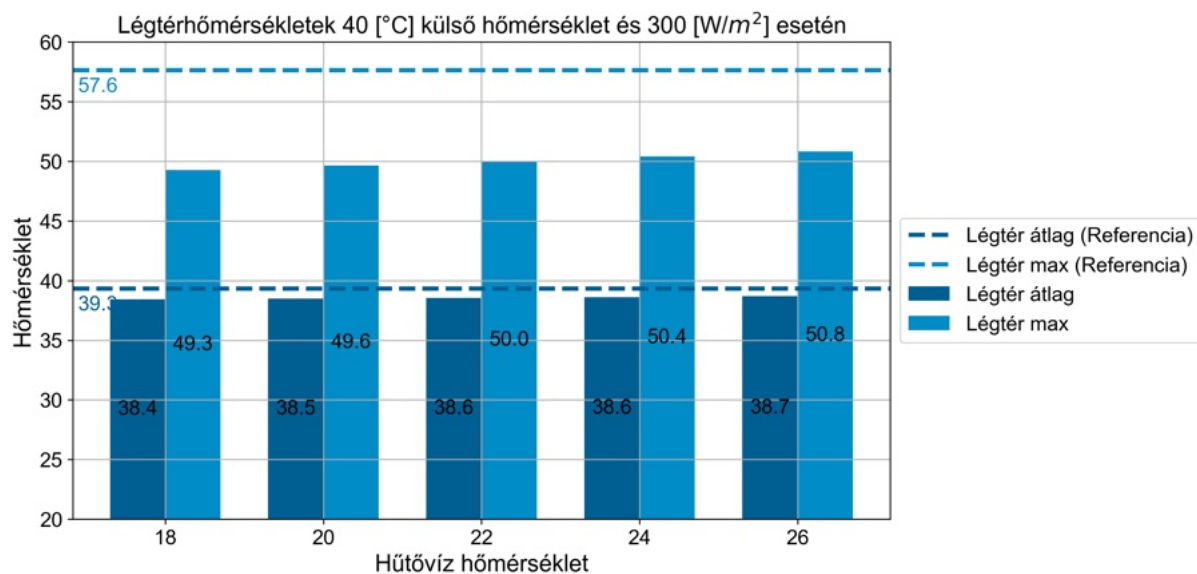


12.14. ábra: Légtér hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 250 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

300 W/m² domináns sugárzás esetén

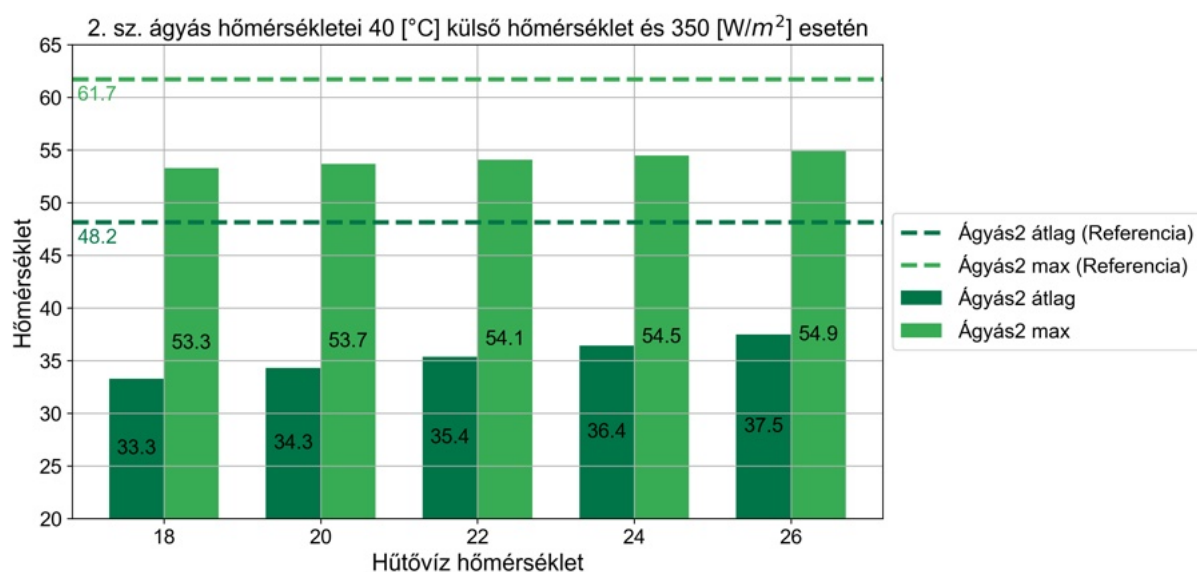


12.15. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

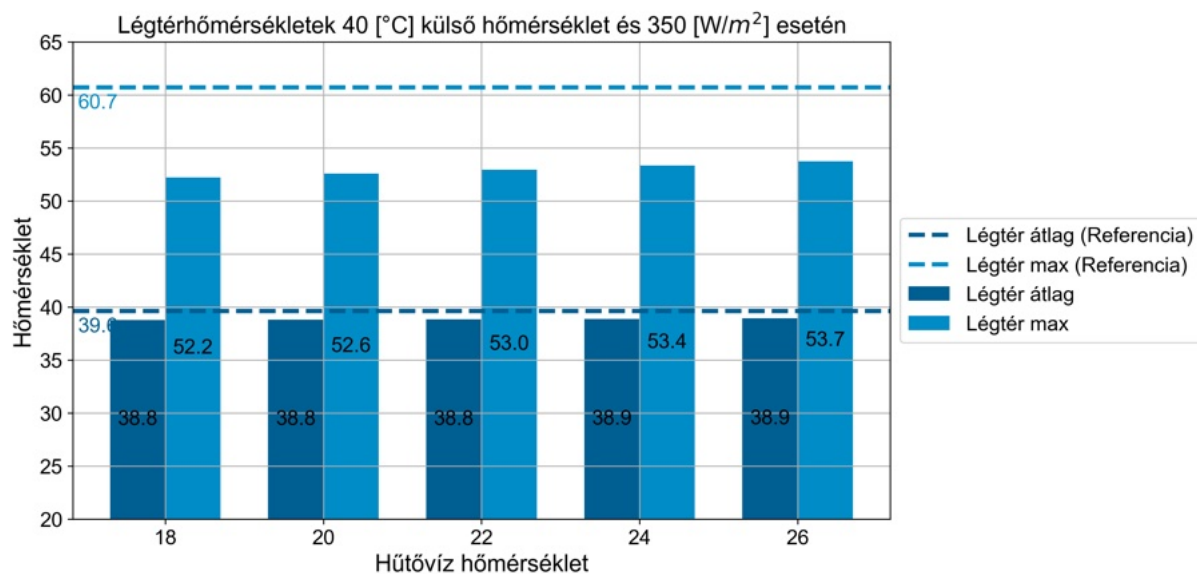


12.16. ábra: Légtér hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 300 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]

350 W/m² domináns sugárzás esetén



12.17. ábra: 2. sz. ágyás hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 350 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]



12.18. ábra: Légtér hőmérsékletei 40 [°C] külső hőmérséklet és 450 [W/m²] domináns napsugárzás mellett. [saját munka]