

Napterek

Ujfalusi Máté

PTE, Fizikai intézet, informatikus-fizika szak

Konzulensek: Dr. Német Béla, Dr. Koniorczyk Mátyás
2010. december 2.

Tartalomjegyzék

Napterek használata az építészetben	1
A naptér	2
A napsugárzás vizsgálata	3
A végelem módszer (FEM - Finite Element Method)	9
Hővezetés vizsgálata végelem módszerrel	10
Naptér szimulálása	11
Modell továbbfejlesztése lehetséges	16
Összefoglalás.....	17
Függelékek	18
Fizikai mennyiségek.....	18
Hivatkozások.....	18

1. Napterek használata az építészetben

A globális felmelegedés előrehaladtával egyre fontosabb a kevesebb káros anyag kibocsátásával járó, nem fosszilis rendszerű fűtőberendezések használata. A nem fosszilis forrásokat megújuló forrásoknak nevezzük. Ilyen pl. a Nap energiája, a szél-, a geotermikus hő-, és a dagály-apály energiája. Ezen energiák használata még manapság sem olyan elterjedt, mint azt szeretnénk. Ugyanis nem mindig süt a nap, nem mindig fúj a szél, de azt már megszokhattuk, hogy a gáz és a kőolaj mindig van a vezetékben. Talán ha majd akadozni fog az ellátás többen gondolnak ezen környezetkímélő alternatívákra. A legtöbb megújuló energiaforrást használó rendszernek jelentős költségbe kerül a kiépítése, míg egy gázkazán igen olcsón beszerezhető, lévén sok a gyártó, régi, kiforrott a technika. Azonban létezik egy olyan rendszer, mellyel jelentős energia takarítható meg, és a kiépítése sem túl drága. Ez a naptér.

Célom számítógépes környezetben szimulálni egy naptérben a hővezetés általi hőmérsékletváltozásokat. Ehhez tárgyalni fogom a napterek általános jellemzőit, napsugárzás tulajdonságait, a jó naptér ismérveit, továbbá a megvalósításához szükséges eszközöket.

A következő „**A Naptér**” című fejezetben a naptér általános ismertetését tűzöm ki célul, melyben a bemutatásra kerülnek a napterek típusai és azok közötti eltérések. Az ez utáni „**A napsugárzás vizsgálata**” című fejezetben a napsugarak naptérre gyakorolt hatását tárgyalom ki bővebben, kitérve a felhőzöttség-, magasság befolyásoló tényezőire is. A következő fejezetben a végelem módszerrel kívánok foglalkozni - A végelem módszer (FEM - Finite Element Method) -, kiemelve a hővezetéssel kapcsolatos ismereteket e témakörben. Az ez utáni fejezet

konkrétan a célom megvalósításával foglalkozik, mely a „Naptér szimulálása” címet viseli. Ezt az **Összefoglalás** című fejezettel zárom, majd mellékletként a **Függelékek** című fejezetben néhány, a munka során szereplő fizikai mennyiség pontos definícióját ismertetem meg. A **Hivatkozások** című fejezettel zárom.

2. A naptér

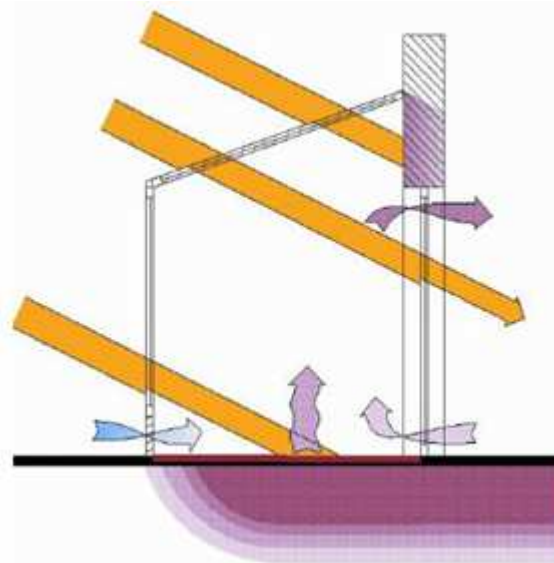
A naptér egy csatlakozó vagy „beharapott” üvegház, télikert. Olyan tér, amelynek van transzparens külső térhatárolása, kapcsolódik az anyaépülethez, nincs mesterséges fűtése. A naptér pufferzónát képez az anyaépület és a külső tér között, ezzel az anyaépület hőveszteségét csökkenti. (angolul „*sunspace*”, Németországban „*Wintergarten*”, az Egyesült Királyságban „*conservatory*”) Tehát egy a ház déli oldalához csatolt üvegfalú építmény. A naptér pufferzónát képez a külső és a belső tér között, így hőmérséklete a két zóna között van téli napokon.

A naptérben lévő falak, padló, és felmelegednek a napsugárzás (az 1. narancssárga csík) hatására nappal. éjszaka leadják hőjüket lassan a naptérnek, illetve a padló és belső fal a hő egy részét a belső térre, amivel mértéke csökkenthető. (Az 1. ábrán a jelöli a meleget, kék a hideget.) A szellőztetés télen úgy történik, hogy külső tér és a naptér és a belső tér van egy kis mértékű szellőztetés, méghozzá a naptéren keresztül szellőzik a belső tér, ami által eleve valamivel melegebb levegőt juttatunk belső térbe miután áthalad a naptéren, hőmérséklete ugye a külső tér és a

közötti. Ezzel a szellőztetéssel viszont alacsonyabb lesz valamivel a naptér hőmérséklete. Fontos, hogy éjjel csak a naptér és a belső tér között szellőzzön a rendszer, hogy le tudja adni a naptér a belső térnek a nappal összegyűjtött meleget, továbbá a hidegebb éjszakai levegő ne hűtse le a rendszert. Természetesen az sem mindegy, hogy a levegő milyen irányban áramlik. Ha kell ventilátorral segíthető a megfelelő irányú áramlás.

Nyáron a megfelelő szellőztetés ugyanúgy elengedhetetlen, mint télen. Ilyenkor a naptér üvegházként nagyon nagy belső hőmérsékletre tehet szert, ami a belső tér szempontjából nem hasznos, továbbá meggátolja a naptérben való tartózkodást. Ezért nyáron a külső tér és a naptér között erőteljes szellőztetésre van szükség, továbbá hasznos ha a belső tér nem a naptéren keresztül szellőzik a nyári nappali órákban. Nyáron nappal a megfelelő árnyékolást is meg kell oldanunk. Minél kevesebb napfény jut a naptér üveg falára, annál kevésbé melegszik fel a mögötte lévő terület. Éjszaka természetesen az árnyékolás nem fontos, nyáron ilyenkor lehet a naptéren keresztül történő szellőztetést alkalmazni, ha hűvösebb éjjelre számíthatunk.

A pufferhatás annál nagyobb, minél több energiát el tudunk raktározni a naptérben lévő falakban, padlóban, tárgyokban. Emiatt a pufferhatás a következő ábrán bemutatott módon csökken balról jobbra:



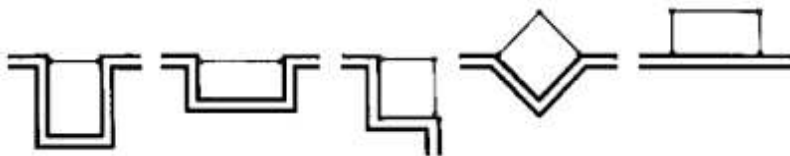
1. ábra
A naptérek működési elve. Forrás: [5]

tárgyak
ábrán
Ezek

átvezeti
a fűtés
lila szín

nappal a
között is

be a
aminek
belső tér

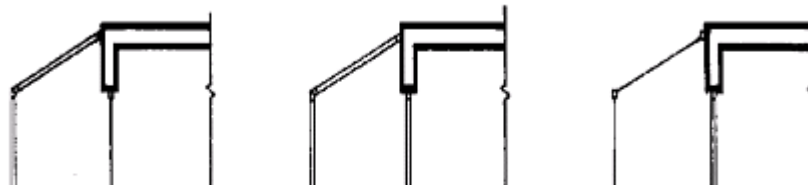


2. ábra

Balról jobbra csökkenő pufferhatású napterek, geometriát vizsgálva. Forrás: [5]

Természetesen nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy az ábrán szereplő képek felső nézetben vannak, a falak alatt, illetve felett üvegfelület található a naptér definíciójából következően, mint ahogyan a következő ábrán is láthatjuk. Az üvegezéstől függően a következő módon változik a naptér pufferhatása (balról jobbra csökkenő mértékű):

Megfigyelhető az ábrán, hogy az első képen dupla üvegezés található a külső felületen, míg a belsón szimpla. A következő képen dupla üvegezés van mindkét területen, míg az utolsó képen



3. ábra

Balról jobbra csökkenő pufferhatású napterek, üvegezést vizsgálva. Forrás: [5]

szimpla üveget kapott a külső felület, duplát a belső.

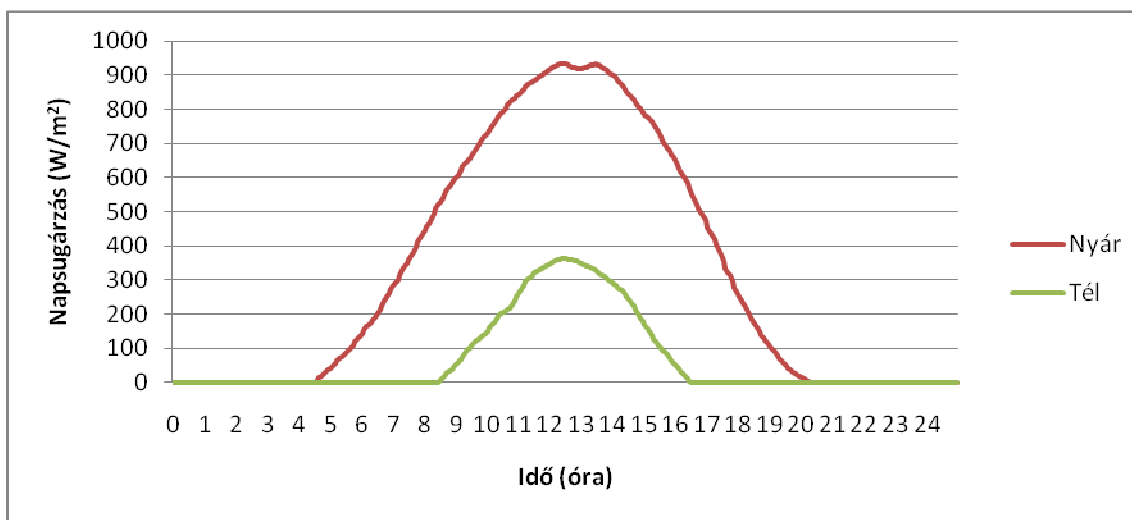
A naptérnél megemlíthető még a hangszigetelő hatása is a belső térrészre nézve.

3. A napsugárzás vizsgálata

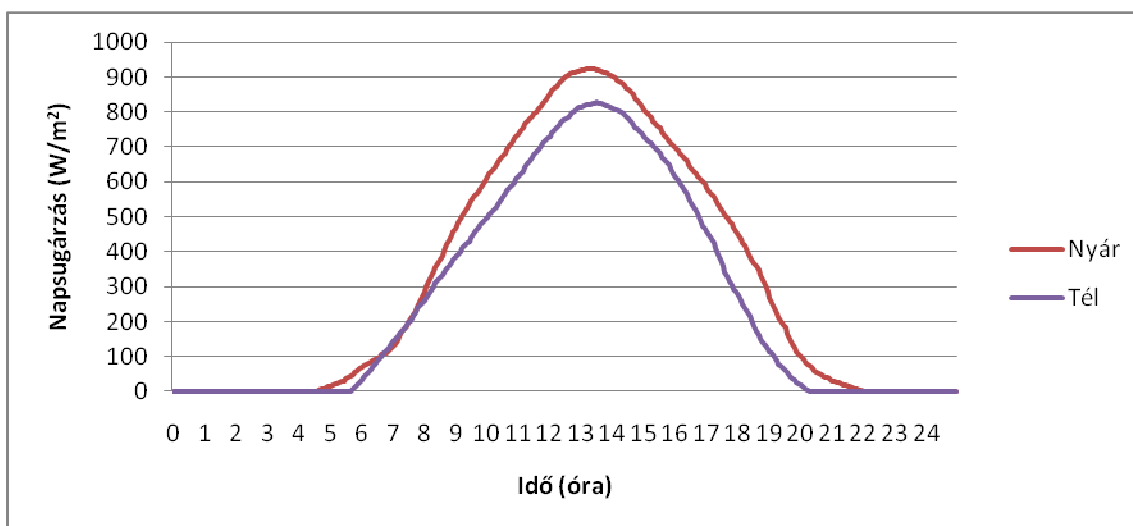
A Föld atmoszférájára a napból 1300-1400 W/m²összsugárzás érkezik évente. A kérdés az hogy mennyi jut el ebből a sugárzásból a Föld felszínéhez, a naptérhez. Ez több tényezőtől függ:

- a beeső sugárzás szögétől, ami függ a nap éves keringésétől, napi járásától, a terület fekvésétől és dőlésétől,
- a sugárzásnak a légkörben a talajig megtett útjától (tengerszint feletti magasság),
- a légkörben lévő gázok, gőzök, porszemcsék mennyiségétől és minőségétől.

A következő két ábrán két különböző beesési szög mellett látszik az üvegre jutó napsugárzás mértéke nyáron és télen. A 4. ábrán a vízszintes felületre érkező napsugárzás látható, az 5. ábrán pedig a vízszintessel 45°-os szöget bezáró üvegfelületre érkező napsugárzás. Nyilvánvalóan kitűnik, hogy a döntött elrendezés sokkal hasznosabb, mivel télen szinte azonos mértékben gyűjti be a napsugárzást mint nyáron. Ezért érdemes naptereket úgy tervezni, hogy legyen benne (ha nem is 45°-os) döntött felület. Az 1. és 3. ábrákon láthatjuk, hogy a naptereknek függőleges felületük is van, ami szintén télen hasznos, amikor a nap beesési szöge kisebb, mint nyáron.

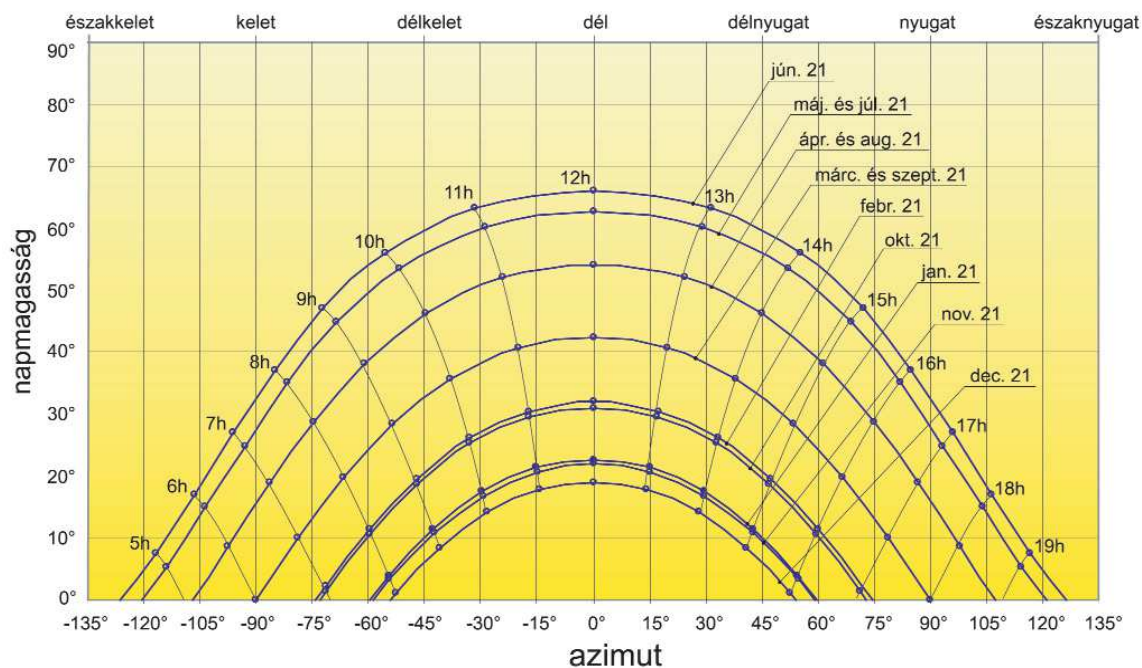


4. ábra
Nap-besugárzás vízszintes felületen nyáron és télen. Az adatok forrása: [3]



5. ábra
Nap-besugárzás 45°-os dőlésszögű felületen nyáron és télen. Az adatok forrása: [3]

A következő ábráról az év különböző szakában lehet leolvasni a nap járását, sugárzásának beesési szögét Magyarországon.



6. ábra
Nappályadiagram Budapestről szemlélve. Forrás: [1]

Azimut: (arabul: tetőponti szög), az a szög, amelyet valamely magassági kör képez a meridiánnal.

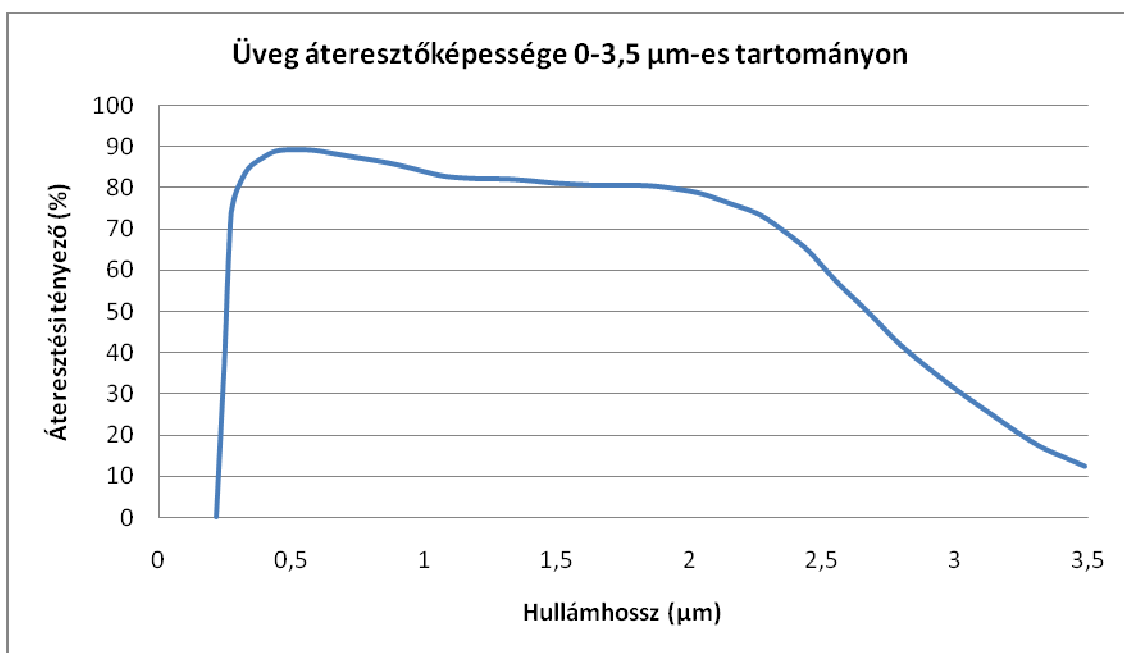
Meridián: Az azonos hosszúságú pontok alkotta görbe a meridián, vagy más néven hosszúsági kör. A kezdő meridián (0), egy a Föld felszínén önkényesen kijelölt ponton, a greenwichi obszervatóriumon (Royal Observatory, Greenwich) halad keresztül. A meridiánok azonos hosszúságúak és nem párhuzamosak: mindegyik áthalad az északi és a déli póluson.

Elmondható hogy minél több utat tesz meg a napsugárzás a Föld légkörében, annál több energia disszipálódik. Legalkalmasabb, ha közvetlen - direkt - sugárzás éri a napteret, annak energiája nyerhető ki a legjobb hatásfokkal. A közvetett - diffúz - sugárzás, ami a levegőben lévő gázok, gőzök, porszemcsék felületéről visszavert, illetve rajtuk történt áthaladáskor keletkezett - kevésbé kecséget kiemelkedő melegítő hatással, lévén kevesebb energiával rendelkezik mint a direkt sugárzás.

Bármely felületre érkező sugárzás háromféleképpen viselkedhet:

- Elnyelődik, melyet az elnyelési (abszorpciós) tényező jellemez: a
- Visszaverődik, melyet a visszaverődési (reflexiós) tényező jellemez: r
- Áteresztődik, melyet az áteresztési (transzmittálási) tényező jellemez: t

Ezen tényezőkkel kifejezve leírhatjuk, hogy a teljes beérkező sugárzás megegyezik az elnyelt, visszavert, és az áteresztett sugárzások összegével: $E=a+r+t$. Ha mindhárom tényező nagyobb, mint nulla, akkor a test áteresztő (transzparens), viszont ha a $t=0$, akkor a test nem áteresztő („nem átlátszó” - szokták mondani, de a „nem átlátszó” fogalom csak a látható fénysugarakat áteresztő anyagra használható, a teljes napsugárzásra - lévén széles spektrumú - nem).



7. ábra

Az üvegre érkező sugarak átengedése hullámhossz szerint. Az adatok forrása: [6]

Az ábráról leolvasható, hogy kb. 2000 nm környékén elkezdi csökkenni az áteresztőképesség. Az ibolyántúli sugárzás nagy hányadát nem engedi át az üveg, éles a határvonal 250 nm környékén. (Természetesen ezek az értékek nagy mértékben függenek az üveg fajtájától.) Az infravörös sugárzás tartománya: 0,7-1000 μm, hőszugárzás tartománya: 1-100 μm. Ezen sugárzás egy részét is átengedi az üveg, ami közvetlen módon melegíti a naptérben. Emberi testet legjobban melegítő sugárzás tartománya: 8-15 μm. Ez a sugárzás-tartomány nem jut át az üvegen, de nincs is ezzel baj, mivel az embert nem közvetlen, hanem közvetett módon szeretnék felmelegíteni a naptér segítségével, és nem a naptérben. Maga az üveg is melegszik (abszorpció), ami által hőt ad le a naptérnek, ezt is figyelembe kell vennünk.

Az áteresztő szerkezetek energiamérlegének számítására szokás bevezetni egyszerűsített modellt, melyet az I_{SRG} jellemez. Az I_{SRG} az etalonszerkezeten átjutó hőmennyiség. Ez az etalon egy 3 mm vastag közönséges átlátszó egy rétegű síküveg, melyet az év különböző szakában és a napok különböző óráiban (különböző beesési szögek) vizsgáltak oly módon, hogy megmérték mennyi energia jut át rajta. Figyelembe véve, hogy két áteresztő szerkezeten át a helyiségbe jutó hőmennyiségek aránya gyakorlatilag állandó, akármilyen szög alatt is esik a napsugárzás a felületükre: a **naptényező** az adott üvegezésen keresztül bejutó, valamint az etalonszerkezetnek számító üvegen át, ugyanolyan sugárzási körülmények mellett bejutó hőmennyiség hányadosa (arányszám). Tehát azt mutatja meg hogy az etalonüveghez képest mennyi energia áramlik be a vizsgált üvegen. N -nel jelölik. Az etalonszerkezet adatai mérnökök számára elérhetőek táblázatos formában. Általában nem az N -et hanem az összesített sugárzási tényezőt említik meg a nevesebb, precízebb gyártók termékük leírásánál, amit g -vel jelölnek. Fontos megemlíteni, hogy ez az energiamennyiség nem csak a napsugárzásra vonatkozik, hanem minden más sugárzás hatása is benne foglaltatik, de természetesen a napsugárzás hatása érvényesül legkiemelkedőbben. Az N érték meghatározására szolgáló képlet a $q = I_{SRG} \cdot N$ $\{W/m^2\}$ (1). Az N jellemző értékeit az 1. táblázatban látjuk.

Típus	Árnyékolás nélkül	Belső velencei redőny / 45° vízszintes vagy belső függöny /	Külső velencei redőny /45° vízszintes/	Külső árnyékoló zsalu /17°	Külső nonvvanapernvő

								vízszintes/			
		Világos	Közép	Sötét	Világos	Közép v. sötét	Közép	Sötét	Világos	Közép v. sötét	
	Normál üveg	1,00	0,56	0,65	0,73	0,15	0,13	0,22	0,15	0,20	0,25
	Tábla üveg (6mm vastag)	0,94	0,56	0,65	0,74	0,14	0,12	0,21	0,14	0,19	0,24
Abszorptív üveg	40-48 %	0,80	0,56	0,62	0,72	0,12	0,11	0,18	0,12	0,16	0,20
	48-56 %	0,73	0,53	0,59	0,62	0,11	0,10	0,10	0,11	0,15	0,1
	56-70 %	0,62	0,51	0,54	0,56	0,10	0,10	0,14	0,10	0,12	0,16
Kettős üvegezés	Normál üveg	0,90	0,54	0,61	0,67	0,14	0,12	0,20	0,14	0,18	0,22
	Táblaüveg 6mm vastag	0,80	0,52	0,59	0,65	0,12	0,11	0,18	0,12	0,16	0,20
	Kívül 48-58 % abszorpciójú, belül normál üveg	0,52	0,36	0,39	0,43	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,13
	Kívül 48-58 % abszorpciójú, belül tábla üveg	0,50	0,36	0,39	0,43	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,12
Háromszoros üvegezés	Normál üveg	0,83	0,48	0,56	0,64	0,12	0,11	0,18	0,12	0,16	0,20
	Tábla üveg	0,69	0,47	0,52	0,57	0,10	0,10	0,15	0,10	0,14	0,17

1. táblázat
Példák az (1) képletben szereplő N-re. Forrás: [7]

Nem szabad amellett elsiklanunk, hogy egy házhoz épített naptér nem sokat ér, ha nincs a ház külső felülete kellőképpen szigetelve. Azonban napteret ezen egyszerű definíció tudatában nem érdemes építeni, sok az olyan kérdés, amit egy szakember feltenne megépítése előtt. Vegyük sorra ezeket.

A nap járása szerinti tájolás nagyon fontos, érdemes a napteret a téli hónapokhoz igazítani, arra nézzen ahol télen delel a nap (kissé eltér a nyáritól). Magyarország területén a napsugárzás évi összege 4200–4600 MJ/m², míg a napsütéses órák száma 1700–2200 óra körül alakul. A legmagasabb értékeket az Alföldön, a legalacsonyabbakat a nyugati és az északi országrészekben mérték. Ezen adatok azt jelentik hogy érdemes a napenergiát itthon kihasználni. A legfelhősebb hónapunk december, míg a legderűsebb nyár végén az ég. A felhőzöttségre és a léghőmérsékletre vonatkozó adatokat a következő 2. és 3. táblázatban találhatjuk.

	Magyaróvár	Keszthely	Pécs	Budapest	Kecskemét	Szeged	Békéscsaba	Nyíregyháza	Kékestető
I.	74	71	70	70	68	71	72	70	62
II.	68	64	64	65	61	65	67	65	63
III.	61	58	60	59	55	59	59	56	52
IV.	61	58	60	58	54	59	58	55	54
V.	55	54	53	54	50	53	52	52	49
VI.	55	52	51	52	48	51	50	53	51
VII.	51	47	44	46	42	42	41	47	46
VIII.	49	44	40	43	39	39	39	43	35
IX.	51	47	46	46	42	42	43	45	40
X.	60	57	56	57	51	54	54	53	53
XI.	74	71	70	71	64	69	69	68	64
XII.	78	76	74	77	71	75	77	74	65
Év	61	58	57	58	54	57	57	57	53

2. táblázat

A felhőzet mennyiségének havi és évi átlagai (%). Forrás: [4]

	Magyaróvár	Sopron	Zirc	Keszthely	Pécs	Budapest	Kecskemét	Szeged	Békéscsaba	Túrkeve	Nyíregyháza	Putnok	Kékestető
I.	-1,6	-1,3	-2,8	-1,0	-0,7	-1,1	-1,7	-1,2	-1,8	-2,4	-3,0	-3,5	-4,0
II.	-0,1	0,2	-1,0	0,7	1,3	1,0	0,1	0,6	0,1	-0,5	-1,1	-0,9	-3,3
III.	4,9	4,8	3,7	6,0	6,1	5,8	5,1	6,3	5,9	5,1	4,5	3,9	0,2
IV.	9,9	9,6	8,8	10,9	11,9	11,8	10,5	11,4	11,4	10,7	10,1	9,6	4,7
V.	15,0	14,5	13,8	15,9	16,9	16,8	16,0	16,8	16,9	16,2	15,8	14,4	10,4
VI.	17,9	17,6	17,2	19,0	20,4	20,2	19,3	20,0	19,9	19,5	18,7	17,5	13,2
VII.	20,0	19,7	19,3	21,1	22,6	22,2	21,4	22,4	22,3	21,8	20,7	19,4	15,7
VIII.	19,1	18,9	18,1	20,3	21,9	21,4	20,6	21,4	21,3	20,9	19,7	18,4	15,1
IX.	15,4	15,3	14,4	16,5	17,9	17,4	16,3	17,5	17,2	16,6	15,6	14,9	11,9
X.	9,9	9,7	9,2	10,9	11,8	11,3	10,6	11,9	11,3	10,8	9,9	9,2	5,1
XI.	4,4	4,2	3,7	5,3	6,2	5,8	4,6	5,9	5,3	4,6	4,1	3,2	0,7
XII.	0,5	0,5	-0,8	1,0	1,8	1,5	0,6	1,4	0,6	-0,1	-0,4	-0,5	-2,2
Év	9,6	9,5	8,6	10,5	11,5	11,2	10,3	11,2	10,9	10,3	9,5	8,8	5,7

3. táblázat

A léghőmérséklet havi és évi középértékei (°C). Forrás: [4]

A napteret a ház déli oldalára kell csatolni, hogy a téli napsütés hasznosítva legyen, ám a nyári napsütéssel mi a helyzet? Megfelelő árnyékolásról gondoskodni kell, különben nyáron elviselhetetlenül meleg házat kapunk. Ezt az árnyékolást a teljes napter felületén el kell végezni, mégpedig oly módon, hogy ha kell igen sebesen lehessen váltani az árnyékolás a nem árnyékolás állapotok között. Az árnyékolás fajtája lehet kihúzható vászon, avagy szilárd redő, avagy redőny is.

Nem mindegy a ház fekvése sem, az évi napsütés órák száma és az egyéb árnyékoló tényezők szempontjából. Általánosságban elmondható, hogy a magasabban fekvő házak (hegyekben) több napsütés órával bírnak évente mint az alföldi avagy völgyi társaik. Ámbár nagyobb magasságokban

hidegebb az átlaghőmérséklet. Átlagosan 200m-enként 1 °C-kal hűl felfelé haladva a levegő. Nem mindegy a naptér falát alkotó üveg fajtája sem. Nem mindegy, hogy milyen az üveg vastagsága, hogy bírja az ütést, terhelést, főleg a naptér tetején lévő üvegfelületeknél. Az üvegfalak ismert módon rossz hőszigetelők, ezért el kell gondolkodni a 2 és 3 falú üveglapok alkalmazásáról is. Azonban a több üvegfelület és köztük a vákuum akadályozza a napfény melegének bejutását a belső térbe, ezért egy elfogadható optimumot kell keresni erre vonatkozólag. Mindenképpen az egy elsődleges szempont kell legyen, hogy több energia jusson be a naptérbe mint amennyi eltávozik onnan.

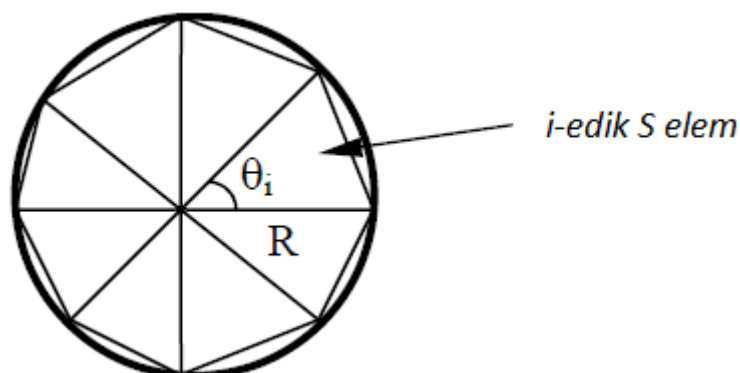
Fontos még megemlíteni hogy a szellőztetés is része a jól kivitelezett naptérnek, főleg nyári napokon tud nagyon hasznos lenni. Nyáron nappal érdemes folyamatosan nyitva tartani a szellőző rendszert, míg téli éjszakákon nem túl jó nyitva hagyni. Ha már a külső tér – naptér közötti szellőztetést megemlítettük, ne feledjük, hogy a naptér és belső tér közötti szellőztetés épp oly fontos. A begyűjtött hővel nem a naptér, hanem elsősorban az amögött elhelyezkedő lakótér fűtésének csökkentése a cél.

A naptérben lévő tárgyak, bútorok, padlózat fényelnyelő képessége is lényeges. Gondoljunk csak bele, mennyire más hatása lenne egy tükrös padlónak és egy fekete gumipadlónak. És ha már a padlónál tartunk nem árt észben tartani azt is hogy a padló a föld felé is leadja a hőt, tetemes mennyiséget, ha nem teszünk ellene. Alulról is szigetelni érdemes a rendszert, minél erősebben, annál jobb. (sokan a ház építésénél sem veszik figyelembe az alulról eltávozó hőt, van hogy a fűtés egy része a ház alatt elhelyezkedő pincét fűti.)

4. A végelem módszer (FEM - Finite Element Method)

A következőkben az ezzel kapcsolatos alapismereteket foglaljuk össze [2] alapján.

A végelem módszer a műszaki tudományokban általánosan elterjedt eljárás parciális differenciál-egyenletekkel leírható modelleken végzett számítások elvégzésére. A végelem analízis alapja, hogy egy összetett, analitikusan általában nem kezelhető rendszert felosztunk sok kicsi könnyen kezelhető részre, és azokat oldjuk meg külön-külön. Bemutatható a módszer alapja a kör területének meghatározása esetében:



8. ábra
A kör területének közelítése háromszögekkel

A 8. ábrán egy kört láthatunk, amit felosztottunk $i = 8$ részre. Ezek a részek a "végelemek", továbbiakban elemek. Az elemek háromszögek, a közös metszéspontjuknál a száruk által bezárt szöget jelöljük az S_i elemben θ_i -vel.

Egy háromszög területe: $S_i = \frac{1}{2} R^2 \sin \theta_i$.

Ebből a teljes kör területe: $S_n = \sum_{i=1}^N S_i = \frac{1}{2} R^2 N \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right), N \rightarrow \infty$,

ahol N az elemek (háromszögek) száma. Nagyobb N -re pontosabb végeredményt kapunk, de mindig mérlegelni kell, hogy mekkora pontossággal kell meghatározni az adott feladatot, illetve a számolásokat végző számítógép teljesítménye elegendő-e. 1940-es években találták ki ezt az eljárást, manapság a mindennapokban használják főként a mérnökök. Jelentősebben a '90-es évektől kezdve használják, mert akkor érték el a számítógépek azt a teljesítményt, ami szükséges ezen számolásokhoz. Lényegében amikor azt halljuk, hogy számítógépen szimuláltak valamit (erőket, hőmérsékletváltozást, autó töréstartást, stb.), akkor rendszerint a végelem módszerrel tették azt.

A végelem módszer alkalmazásakor a következő lépéseken kell végigmennünk:

1. Felosztjuk a struktúrát elemekre, melyekre csúcsainak koordinátaival tudunk hivatkozni (háló, avagy *mesh* generálás).
2. Mindegyik elemre meghatározzuk az azt leíró fizikai összefüggést.
3. Az elemeket összhangba hozzuk a csúcsokkal, hogy egy teljes rendszer legyen, mely leírja a teljes struktúrát - egyenletrendszert készítünk.
4. Megoldjuk az egyenletrendszert.
5. Meghatározzuk a vizsgált elemre, elemekre (a struktúra nekünk érdekes részére) a megoldást az előző komplett megoldásból.

Voltaképpen a 2. pontban vektorokat készítünk, amikkel a 3. pontban egy mátrixot kapunk. Ezt a mátrixot kell megoldani a lineáris algebrában megismert módszerek valamelyikével, avagy számítógépen a megfelelő algoritmusokkal.

Az elemek háromfélék lehetnek:

1. 1 dimenziósak, amit egy szakasz szemléltet.
2. 2 dimenziósak, amit egy három vagy négyszög szemléltet.
3. 3 dimenziósak, amit egy tetraéder, vagy hexaéder szemléltet.

A háló (*mesh*) elkészítésekor nagyon okosan kell eljárni, mert a háló csúcspontjai közötti távolság, elemeinek száma határozza meg főként, hogy mennyi számolást kell elvégezni. Tehát elmondható, hogy ez a háló lesz az alapja az egésznek. Ha a háló nem elég sűrű, akkor pontatlan eredményt kapunk. Viszont ha túl sűrű, akkor feleslegesen számolunk. Ezért sok esetben érdemes adaptív hálókészítést használni. Az azt jelenti, hogy más és más a hálósűrűség a struktúra különböző részein. Gondosan kell a paramétereket megválasztani, hogy a végén pontos eredményt kapjunk. Ezt a következő példával illusztráljuk:

Egy jármű töréstartást kívánjuk elvégezni. Dinamikai feladat, erőhatásokat kell vizsgálni, sebességeket és az anyagi minőségnek megfelelő módon történő anyagváltozásokat (fémek elhajlása, műanyag törése). Ha például a jármű elején történik az ütközés, akkor érdemes ott sűrűbb hálót használni, mint a jármű legvégén. Egy ilyen jármű elvégre kompozit, sok-sok anyagból áll, így nem mindegy hogy például egy óráig dolgozik rajta a számítógép, vagy két napig (ezek nem mért értékek, csak a szemléltetés kedvéért szerepelnek itt).

A hővezetés vizsgálata végelem módszerrel

Fourier hővezetési egyenlete (Fourier-törvény) 3 dimenziós esetben:

$$\vec{q} = -k\nabla T,$$

ahol \vec{q} és ∇T 3 dimenziós vektorok:

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = -K \begin{pmatrix} \partial T / \partial x \\ \partial T / \partial y \\ \partial T / \partial z \end{pmatrix},$$

ahol q_x a q hőfluxus x irányú, q_y az y irányú, q_z pedig z irányú komponense. Izotróp esetben:

$$K = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix}$$

Ehhez a differenciálegyenlethez meg kell adnunk a peremfeltételeket: az adott határoló felületnek lehet adott hőmérséklete, vagy áramolhat rajta keresztül felületegységenként adott mennyiségű hő. Mindezeket megadva a cél a differenciálegyenlet megoldása a megadott peremfeltételekkel, ami a hőmérséklet eloszlását szolgáltatja.

Végesem módszerrel ezt úgy oldjuk meg, hogy kifeszítjük a hálót, és annak csúszpontjaiban adjuk meg a hőmérsékletet. Ezen hőmérséklet értékeket egy \mathbf{T} vektorba rendezzük. A hővezetés leírása ez esetben az alábbi összefüggéssel történik:

$$\mathbf{K}_T \mathbf{T} = \mathbf{q},$$

ahol \mathbf{K}_T a hővezetési mátrix, \mathbf{q} pedig az ún. hőeloszlás-vektor (*vector of thermal loads*).

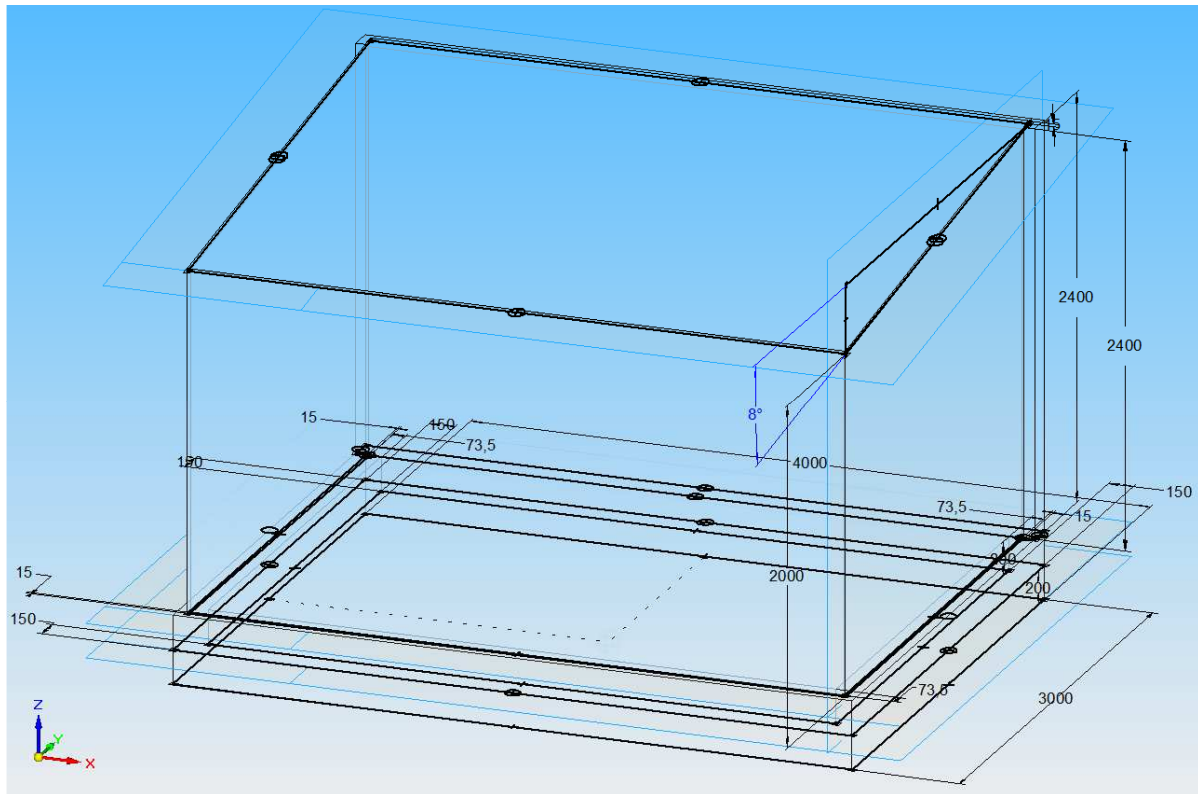
Ezek a mennyiségek a modell adatai alapján meghatározhatók, a diszkretizált feladat pedig megoldható. Ennek elvégzésére kész, kiforrott szoftverek állnak rendelkezésre.

5. Naptér szimulálása

Céлом egy olyan modell készítése, amiben a napfény melegítő hatását tudom vizsgálni bizonyos megkötésekkel, de meglehetősen pontosan. A modellnek meg kell felelnie az előzőekben megismert tulajdonságoknak, amik egy napteret jellemeznek. Továbbá a modellnek olyannak kell lennie, amit a valóságban is viszonylag könnyedén meg lehet építeni, semmi olyat ne tartalmazzon, aminek megvalósítása jelentős anyagi terheket róna az építetőre.

Ennek érdekében a naptér szimulációjához két programot használtam: Solid Edge-et [9] és COMSOL Multiphysics-et [8]. A Solid Edge egy CAD program, melyben a naptér vázát szerkesztettem meg. A COMSOL program képes CAD programmal tervezett konfigurációkat megfelelő formátumú állományból (esetünkben: .stp állomány) importálni.

A 2. ábra 5. elrendezését választottam, azon mutatom be a naptér hőmérsékleti változásait. Bár az 5. elrendezés a legkisebb pufferhatású, de mivel szem előtt tartottam azt, hogy naptér nem feltétlenül a házzal egyidőben kerül beépítésre, így mégis emellett döntöttem. Manapság Magyarországon még nem divat az építészek és az építetők körében, hogy naptereket tervezzenek, terveztesenek a házukba. Az 5. elrendezés viszont bármely ház falához hozzácsatolható jelentős átépítés, vagyis költségek nélkül. Emeletes-ház esetében is, ha az erkély délre néz beépíthető az.



9. ábra

A naptár váza, CAD (Computer Aided Design = számítógéppel segített tervezés) programmal szerkesztve

A vizsgált naptér alapja egy 4000x3000x200 mm-es betontömb, ezen egy betonkoszorú található, melynek vastagsága 150 mm, magassága 200 mm. Hátulról egy 4000x150x2400 mm-es fal szegélyezi. Elöl és oldalt a betonkoszorú felett üveg található, 15 mm vastag, felül pedig ugyanígy 15 mm vastag üveglap fedi, mely a vízszintessel 8°-os szöget zár be. A 9. ábrán a teljes modell képe látható méretekkel együtt.

Jogos kérdés merülhet fel: Miért nem a szabványos 3 mm vastag üveglapot terveztem a modellbe? Az itt vizsgált modell egy viszonylag egyszerű közelítés, első körben nem kívántam adaptív hálógenerálással foglalkozni. Ennek hiányában viszont a vékonyabb üveg beállítása a vizsgált probléma hálójának méretét oly mértékben megnövelte volna, hogy a modell asztali számítógépen nem lett volna kezelhető. Az üveget megfelelő vastagságúra választva adaptív hálókezelés nélkül is asztali számítógépen kielégítő idő alatt lefut a szimuláció. Kétrétegű üveg együttműködésével is számoltam, egy igen jó szigetelésű argon gáz töltésű üveggel (hőátbocsátási tényezője 1,1). Tehát az alapfeltevések nem sérülnek, azoknak megfelelnek.

A modell a 9. ábrán bemutatott naptér, melynek hozzánk közelebbi oldala a déli. Ennek megfelelően állítottam be a szimulációban az értékeket. Modellem a napteret határoló felületek hővezetését vizsgálja, a cél a határoló elemek hőmérsékletének vizsgálata. Az elülső déli oldalát és a felső (a dőlésszög miatt ugyancsak délre néző) oldalát 850 W/m^2 besugárzás éri, ami a 4. és 5. ábráról leolvasható, hogy télen is és nyáron is megfelel a valóságnak. Azért csak az elülső oldalak kaptak besugárzást, mert pontban délben vizsgálva csak ezeket éri közvetlen napfény. Modellemben egy adott időben vizsgálom a hőmérsékleteket, pontosan délben, mert akkor az azimut 0° , pont a naptér déli oldalát süti a nap. A tárgyalt egyszerűsített modellben a hőmérséklet stacionárius eloszlását számolom ki, időfüggéssel nem foglalkozom. Tehát a kiszámított stacionárius eloszlás úgy értendő, hogy feltételezzük: kialakulásáig a nap nem mozog, a külső hőmérséklet pedig nem változik. Noha ez jelentős egyszerűsítés, látni fogjuk, hogy az eredmények így is sokmindent elárulnak az adott naptér viselkedéséről. A modellezett naptér

tetejét 4 oldalról üveg fedi, ezen felületek tulajdonságai a következők:

- Az üveg hővezetési tényezője: $0,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Az üveg hőkapacitása állandó nyomáson: $837,4 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- Az üveg sűrűsége: 2600 kg/m^3
- Az üveg hőátbocsátási tényezője: $1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

A modell naptér hátulját és alját, továbbá oldalát alul beton övezi, ennek tulajdonságai:

- A beton hővezetési tényezője: $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- A beton hőkapacitása állandó nyomáson: $879,3 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- A beton sűrűsége: 2000 kg/m^3
- A beton hőátbocsátási tényezője: $1,09 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Két, párhuzamos, egymástól dx távolságra lévő, dT hőmérséklet-különbségű szilárd falfelület között kialakuló hőáramsűrűség nagysága egydimenziós esetben:

$$\bar{q} = -k \frac{dT}{dx},$$

mely Fourier törvénye (Jean Baptiste Joseph Fourier, 1822)

és 3 dimenziós esetben:

$$\bar{q} = -k\nabla T.$$

Vagyis a kialakuló hőáramsűrűség egyenesen arányos a hőmérséklet-különbséggel és a szilárd test anyagi minőségére jellemző hővezetési tényezővel és fordítva arányos a távolsággal. Ezt az egyenletet kibővítve kapjuk a besugárzott lapokra (határ, perem, *boundary*) a következő egyenletet:

$$-n(-k\nabla T + \rho C_p u \cdot T) = q_0 + h(T_{inf} - T),$$

ahol $[k]=\text{W/m}\cdot\text{K}$ a hővezetési tényező,

∇ a nabla operátor: $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ 3 dimenzióban (vektor),

$[\nabla T] = \text{K/m}$ a hőmérséklet gradiens (hosszegységenkénti hőmérséklet-változás),

$$\nabla T = \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial y} + \frac{\partial T_3}{\partial z},$$

$[\rho] = \text{kg/m}^3$ a sűrűség,

$[C_p] = \text{J/kg}\cdot\text{K}$ az állandó nyomáson vett fajhő (hőkapacitás),

$[u] = \text{m/s}$ a mozgó légtömeg vagy folyadék sebessége (0-nak vettem minden irányban),

$[T] = \text{K}$ a hőmérséklet,

$[q_0] = \text{W/m}^2$ a hő fluxus (betáplált hő, hőáramsűrűség),

$[h] = \text{W/m}^2\cdot\text{K}$ a hőátbocsátási tényező,

$[T_{inf}] = \text{K}$ pedig a külső hőmérséklet.

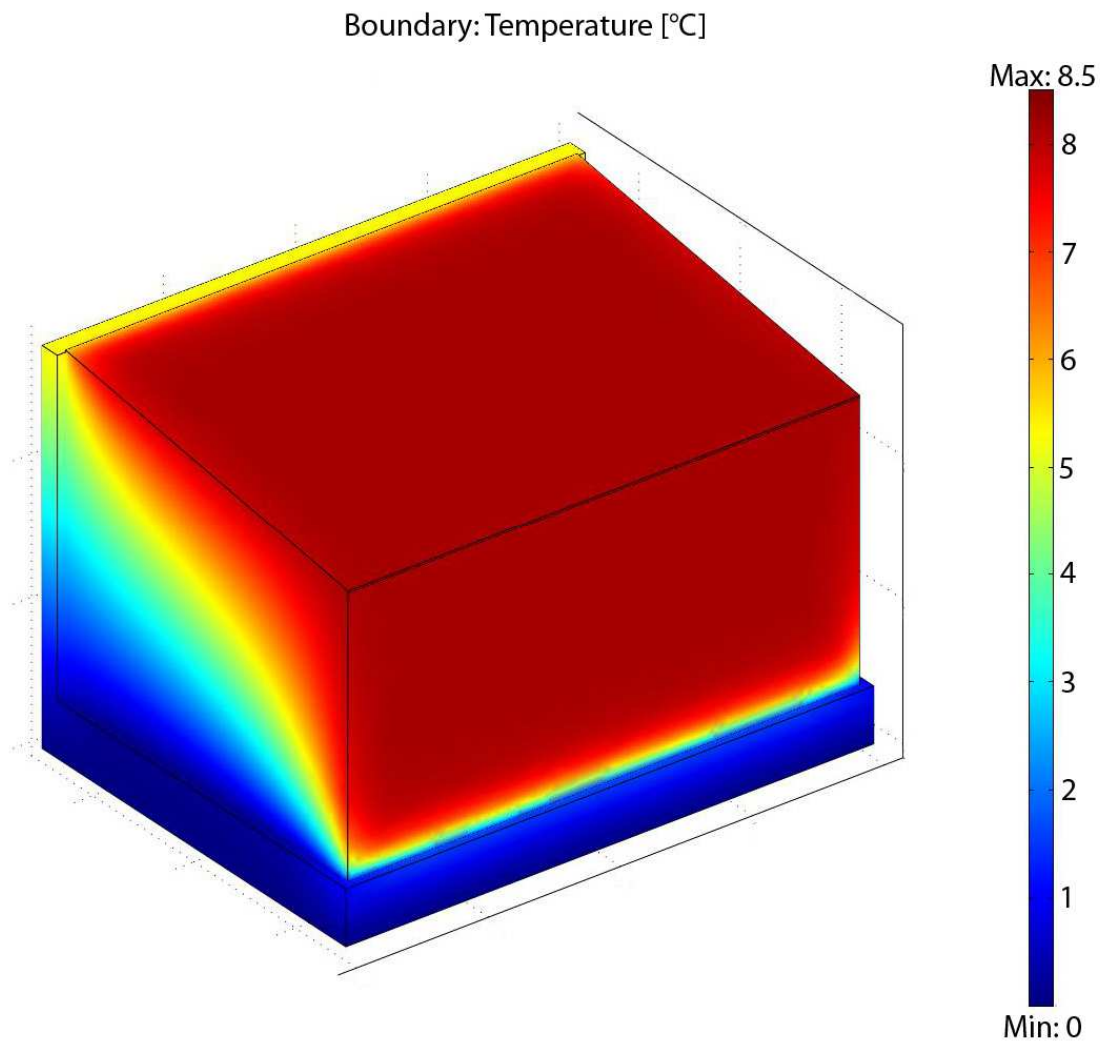
A besugárzást nem kapó lapokra (*boundary*) a következő egyenlet vonatkozik:

$$-n(-k\nabla T + \rho C_p u T) = 0,$$

ahol az egységek az eddigiekben leírtak szerint.

Tehát parciális differenciál-egyenleteket kell megoldani minden egyes elemre, hogy a végén megkapjuk a megfelelő eredményeket. Az elemek egyes tulajdonságai szolgáltatják a parciális differenciál-egyenletekhez a szükséges peremértékeket, amik a megoldásukhoz szükségesek.

A 10. ábrán az előzőekben ismertetett számolások végeredménye látható.

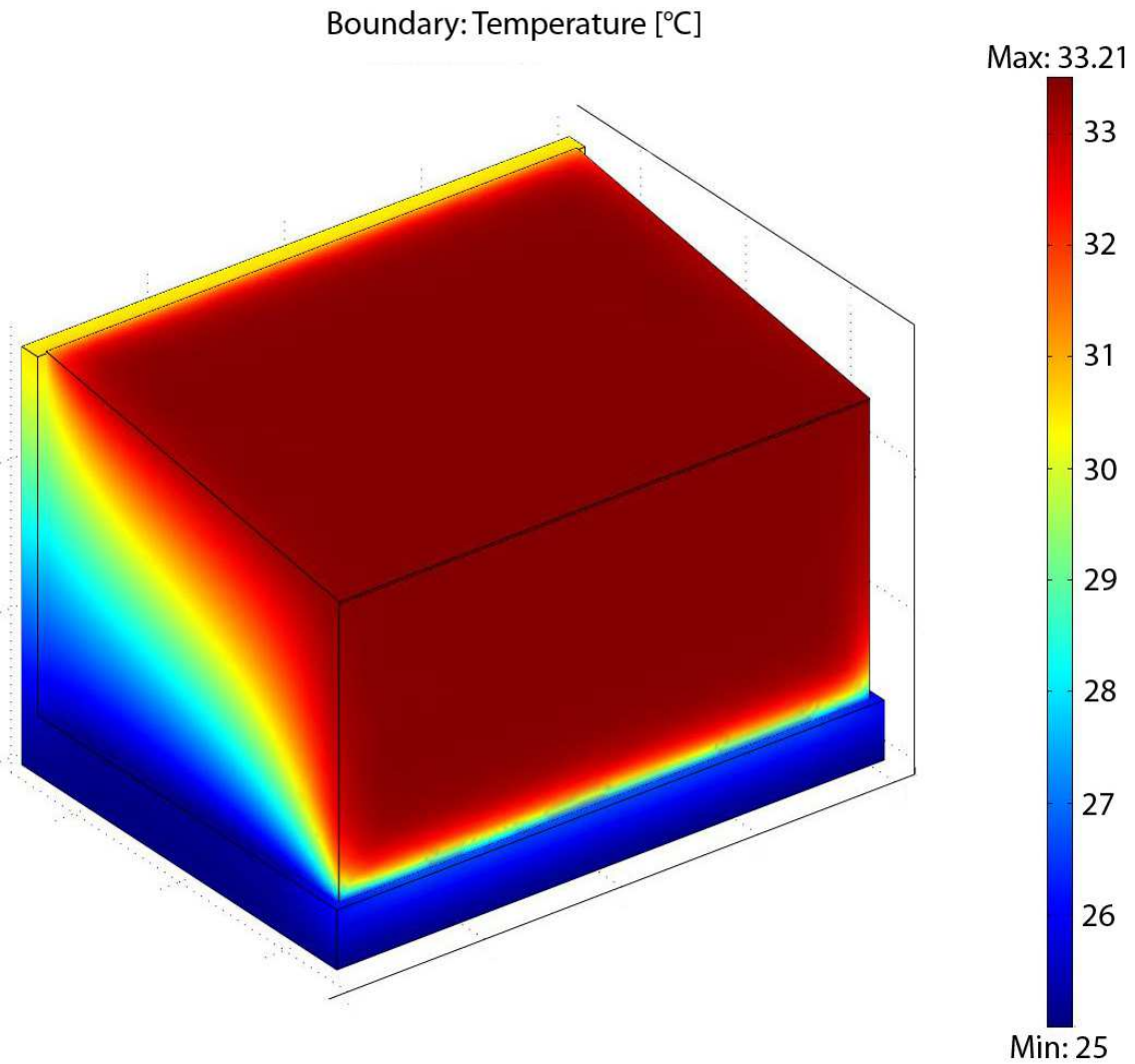


40. ábra
Télen, délben, délről jövő napsugárzás esetén 0 °C-os külső hőmérsékletnél a naptér

A 10. ábrán a naptér hőmérséklet-eloszlása látható, abban az esetben, amikor a 9. ábrán lévő naptérre szemből (délről) süt a nap, déli 12 órában, mégpedig télen 0 °C-os külső hőmérséklet mellett. A legalsó lapra vonatkozó külső hőmérsékletet 0 °C-nak vettem. Közvetett módon jut a rendszerbe a nap energiája: üveglapra esik a 850 W/m²-es besugárzás (ugye az első és felső lapra), és ez az egyetlen betáplált energia. A többi elemén a modellnek a megadott anyagi tulajdonságok szerint változik a hőmérséklet a 2 besugárzott üveglap függvényében.

A 10. ábráról leolvasható, hogy 8,2 °C-ra tud felmelegedni az üveg téli körülmények között a naptér legmelegebb pontján, ami természetesen az, ahol az első és a felső üveglap találkozik. Az oldalsó üveglapok és a beton annak megfelelően hűl, ahogy a modell definiálva lett. A belső tér is ennek megfelelően melegedik: felül melegebb, mint alul.

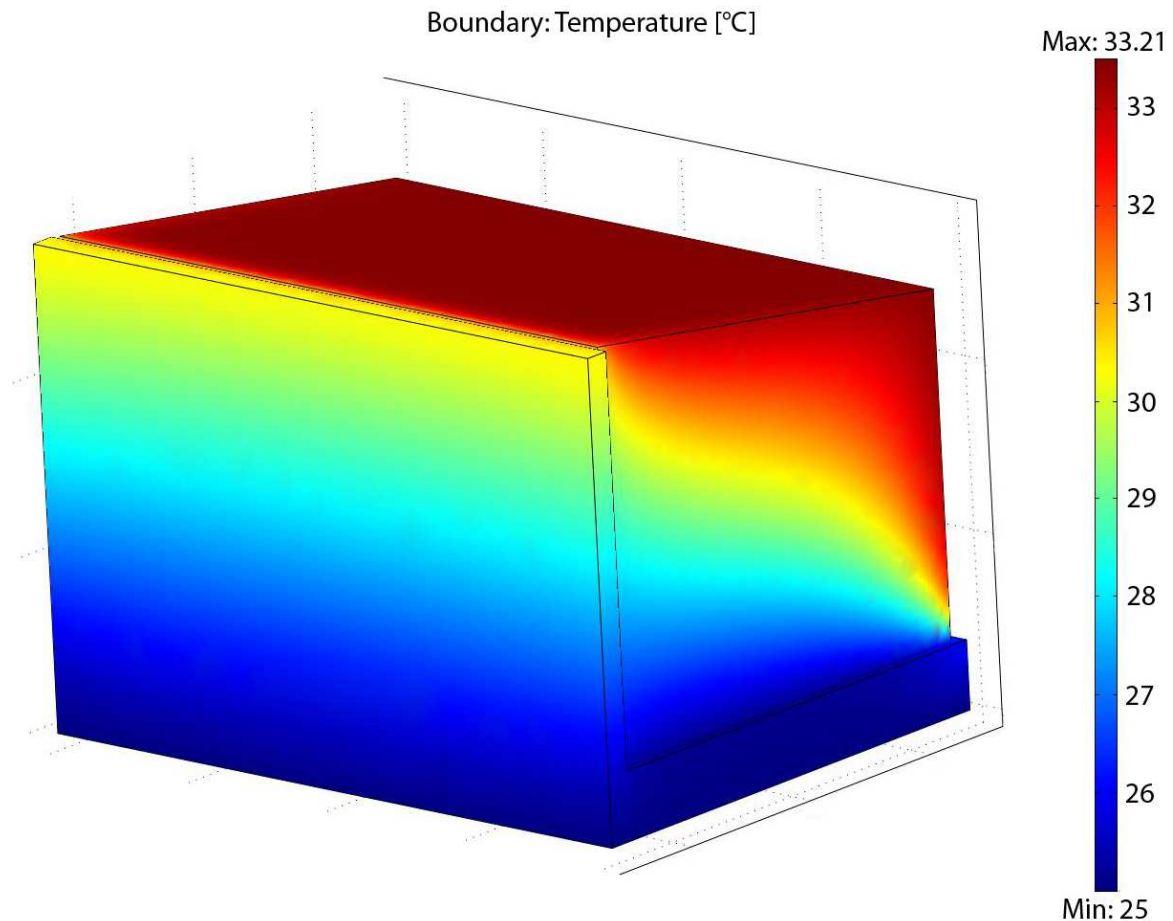
Nyáron a modell a 11. ábrának megfelelően alakul.



51. ábra
Nyáron, délben, délről jövő napsugárzás esetén 25 °C-os külső hőmérsékletnél a naptér

25 °C-kal magasabb jelen esetben a külső hőmérséklet, ezáltal a naptér is annyival magasabb hőmérsékletű. Jelen esetben a hőmérsékleti skála 25 °C-tól indul, és 33,26 °C-ig megy. Mivel csak a hővezetés van a modellbe kalkulálva, így annyival is magasabbak az értékek. Jelen esetben is az alsó és a felső lapot éri hősugárzás, máshonnan nem kap hőt a rendszer.

Megfigyelhetjük, hogy hővezetés szempontjából a leglényegesebb szempont a külső hőmérséklet, nem a besugárzás mértéke. A besugárzás mértéke ugyanis a 4. és 5. ábráról leolvashatóan leginkább a megdöntés mértékétől függ.



62. ábra
A 10-es ábrán lévő naptér hátulról

A 12-es ábrán látszik, hogy a napterünk hátsó beton fala is melegszik, ami által a belső térnek hőt ad le a rendszer. Ez a 12-es ábrán éppenséggel kellemetlenség, mert az a 11. ábra elfordított változata, vagyis nyári körülmények között van. A 10. ábrára értelmezve viszont fűtési költséget takarítunk meg. (A 10. ábrán is ugyanilyen módon változik a hátsó betonfal hőmérséklete, csak az értékek 25 °C-kal kisebbek.)

Modell továbbfejlesztése lehetséges

A modell több úton is továbbfejleszthető jelentős munka befektetésével:

A A jelenlegi modell megtartása és „csiszolása”.

1. A belső térben is lehetne vizsgálni a hőmérséklet eloszlásokat. Esetlegesen bele lehetne helyezni más-más anyagi tulajdonságokkal bíró tárgyakat, amik felszínén vizsgálhatnánk a hőmérsékletet.

2. Az első pont számításai akkor lennének valamire jők is, ha a modellben nem csak a hővezetést, hanem a hőszugárzást is vizsgálnánk. Így a belső térben elhelyezett tárgyaknál nem csak a „klasszikus” tulajdonságok, hanem a színük, fényvisszaverő-képességük és a felületük kidolgozottsága is lényeges volna.

3. Bele lehetne tervezni a jó naptér egy alappillérenek nevezhető dolgot, a szellőztetést. Ekkor a hőáramlással lehetne tovább bonyolítani (és pontosítani) a rendszert. Ehhez megfelelő módon elhelyezett szellőztető lyukakat kellene tervezni a naptér oldalaiba, esetlegesen szellőztető berendezéssel hajtott légcserre sem lenne elvetélt ötlet. Ekkor azzal is bonyolultabbá válna a rendszer, hogy a naptér belsejében lévő tárgyak befolyásolhatják méretükkel, felületük "simaságával", és elhelyezkedésükkel a levegő áramlását. Továbbá a naptérnek nem csak a

külvilág felé érdemes szellőznie, hanem a mögötte lévő lakótér felé is - ez még komplexebbé tenné a vizsgálatot.

4. Ha már egy ennyire komplex rendszert írok le, a modell továbbfejlesztéseként, akkor ne hagyjuk ki a páratartalom vizsgálatát sem. A naptérben lehetnek emberek (télen ritkábban, amikor oly hasznos, de lehetnek), növények is díszíthetik (ne feledjük, hogy német elnevezése „*Wintergarten*” - télikert, Németországban pedig jelentős mennyiségű naptér található). A páratartalom változásával más lesz a belső tér levegőjének a hőmérséklete. Ha hidegebb van a pára lecsapódhat (este), ami melegebbkor (nappal) párologván lehűlést okoz a nedves felületen és közvetlen környezetében.

5. A stacionárius állapotok helyett nyilván érdekesebb volna egy dinamikai szimuláció, ekkor mindent vizsgálhatunk egy teljes napra, hónapra, avagy évre kivetítve, időbeli függést véve alapul. Jelentős mértékben megnövelné a kiszámítandó egyenletek számát ez a lépés, de mégis sokat pontosítana az eredményeken. Nem csak a nap mozgására gondolok itt, hanem a napi hőmérséklet-ingadozásra, az ezzel járó páralecsapódásokkal járó változásokra, és a változó levegőáramlásra is. Az időbeliségnél beleszámíthatjuk a felhős órák számát is.

Véleményem szerint ezen változtatások figyelembevételével olyan modellt kapnánk, amit szuperszámítógépen lenne érdemes kiszámítani.

B A modell más irányú továbbfejlesztése (időigényes és drága, de pontos):

- Építeni egy napteret, és szenzorokkal egy éven át méréseket végezni, a végén a mért eredményeket összefoglalni és kiértékelni.

6. Összefoglalás

Diplomamunkám első felében a naptér, mint építmény meghatározásával foglalkoztam. Megadtam annak pontos meghatározását, és bemutattam jelentőségét. Ezután a naptérben lejátszódó hőmérséklet-változásokat befolyásoló tényezőkre tértem ki, részletesen megemlítve a napsugárzást, mint energiát. Táblázatokkal, ábrákkal szemléltetve, és adatokkal bizonyítva állításaimat. Utána a végeselem módszer alapjait ismertettem, különös tekintettel a hővezetés modellezésére. Végezetül szimulációval megmutattam azt, hogy a naptérben az üveg hővezetése által kialakult hőmérsékletváltozás is jelentős, nem elhanyagolható. Ezért a naptér megalkotásánál ne csak az üvegen áthatoló elektromágneses sugárzás által bentről történő felmelegedést vegyük számításba, hanem ezt is. Leolvashatjuk az ábrákról, hogy az általam állított feltételek mellett (amik valóság-hűek) 8,2 °C-os melegedés tapasztalható a naptér üvegében a külső hőmérséklethez képest. Ha ennek csak egy kis hányadát is be tudjuk vinni a naptér mögött elhelyezkedő lakótérbe már hasznosnak mondható a naptér (télen), pedig a naptér belsejével nem is foglalkoztunk.

7. Függelékek

Fizikai mennyiségek

A következőkben a dolgozatban használt fizikai mennyiségeket foglalom össze.

Sűrűség: Jele: ρ , az adott térfogategység tömegének mértéke.

Hőátbocsátási tényező (hőáteresztési tényező): Jele h , mértékegysége: $W/m^2 \cdot K$. Megmutatja, hogy egységnyi felületegységen történő 1 K-es hőmérsékletváltozáshoz mekkora teljesítmény szükséges.

Hővezetési tényező: Jele k , mértékegysége: $W/m \cdot K$. Megmutatja, hogy 1 m vastagságú anyagon mekkora hő hatol át egységnyi idő alatt, amennyiben a két oldal hőmérsékletkülönbsége 1 K.

Hőkapacitás: Jele C , vagy c , mértékegysége: $J/kg \cdot K$. (A fajhő a fajlagos hőkapacitás, de sokszor a hőkapacitás helyett is használják a megnevezést. Helyesen, vagy helytelenül, de megteszik.) Megmutatja, hogy 1 kg-nyi anyag hőmérsékletének 1 K-nel való megváltoztatásához mennyi energia szükséges.

8. Hivatkozások

- [1]: Műszaki Szaklapok, Fókuszban a napkollektor, 2008. 07. 01. Varga Pál
- [2]: Lecture Notes: Introduction to the Finite Element Method, Yijun Liu, CAE Research Laboratory, Mechanical Engineering Department, University of Cincinnati, 2003. 05. 21., urbana.mie.uc.edu/yliu
- [3]: Magyarországi napsugárzási adatok a napenergia-hasznosítás szemszögéből, <http://www.naplopo.hu/Cikkek/Napsugarzas/napsugarzas.html>
- [4]: Magyarország a XX. században / II. KÖTET: Természeti környezet, népesség és társadalom, egyházak és felekezetek, gazdaság - Főszerkesztő: Kollega Tarsoly István, Babits Kiadó Kft, 1997.
- [5]: BME Épületenergetika Tanszékének Oktatóprogramja: http://www.foek.hu/korkep/zold/f5_1.htm
- [6]: Hősugárzás, hővédő fóliák, Szikra Csaba, Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszék, Építésmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2006. 04. 02.
- [7]: Nyugat-Magyarországi Egyetem, Faipari mérnöki kar, Terméktervezési és Gyártástechnológiai Intézet oktatóanyaga, 2005. 05. 25.
- [8]: COMSOL Multiphysics Modeling and Engineering Simulation Software, COMSOL Group, verzió: COMSOL 3.4.0.24 2007/10/10
- [9]: Solid Edge, Siemens PLM Software, Version 20.00.00.96. 2006.