

Hűtőtornyok tervezésének megközelítése építőmérnöki szempontból

Varga Levente
2023



Pécsi Tudományegyetem
Műszaki és Informatikai Kar
Építőmérnök Tanszék

HŰTŐTORNYOK TERVEZÉSÉNEK MEGKÖZELÍTÉSE ÉPÍTŐMÉRNÖKI SZEMPONTBÓL

Készítette: Varga Levente
Évfolyam: Szerkezet-építőmérnöki MSc 3. félév

Belső konzulens: Kovácsné Dr. Vanya Csilla
Beosztása: adjunktus

Külső konzulens: Dr. Pálfalvi Dóra
Beosztása: statikus vezető tervező

Pécs
2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	5
2. A hűtőtornyok fontossága, elvi működése, a kialakítási lehetőségek bemutatása és azok kivitelezése	7
2.1. A hűtőtornyok működési elve	7
2.2. A hűtőtornyok fajtáinak áttekintése	9
2.2.1. A nedves elven működő hűtőtornyok bemutatása	9
2.2.2. A száraz elven működő hűtőtornyok bemutatása	12
2.3. Hűtőtornyok kialakítási lehetőségeinek bemutatása	15
2.3.1. Acélszerkezetű hűtőtornyok	15
2.3.2. Vasbeton szerkezetű hűtőtornyok	17
2.3.3. Különleges szerkezetű hűtőtornyok.....	20
2.4. Vasbeton szerkezetű hűtőtorny kivitelezése	21
3. A tervezéshez szükséges kiindulási adatok.....	26
3.1. Geometriai és a torony főbb méretei	26
3.2. Méretezés alapelve	26
3.3. VGB-Guideline, szabványok	26
3.4. A Ferrybridge-i katasztrófa (1965) vonatkozása.....	27
3.5. Terhek és teherkombinációk	31
3.5.1. Önsúly	31
3.5.2. Szélteher	31
3.5.3. Hóteher	39
3.5.4. Hasznos teher.....	39
3.5.5. Szerelési terhek.....	39
3.5.6. Földrengés teher	40
3.5.7. Teherbírási határállapot	40
3.5.8. Használhatósági határállapot	41
3.5.9. Stabilitásvizsgálat	41
3.6. Ellenállások, anyagjellemzők.....	42
4. Vasbeton torony.....	43
4.1. Alakmeghatározás	43
4.2. VEM-modell	44
4.3. Felső-, és alsó peremgyűrűk közelítő méretezése	48
4.4. Az X-lábak közelítő méretezése.....	49
4.5. Teherfelvétel	50
4.5.1. Szélteher meghatározása.....	50
4.5.2. Önsúly meghatározása	54
4.6. Stabilitásvizsgálat.....	54
5. Összefoglalás	56
Köszönetnyilvánítás	57
6. Irodalomjegyzék	58

7. Ábrajegyzék.....	59
8. Képjegyzék.....	60
9. Táblázatjegyzék.....	60
Hallgatói nyilatkozat.....	61

1. Bevezetés

A TMDK dolgozatom célja, hogy kellő mélységben bemutassam a hűtőtornyok működési elvét, fajtáit és azok szerkezeti kialakításainak sajátosságait. A témaválasztással szerettem volna kitekinteni az általános építőmérnöki szerkezetek témaköréből. A hűtőtornyok tervezése is része az építőmérnöki feladatok széles spektrumának, azonban egy elég különleges területnek mondható. A TMDK dolgozatom témájának motivációja az, hogy egy olyan szerkezettel foglalkozzak, ami túlmutat az alapvető tanulmányaimon és ami különlegesnek mondható.

Kiemelkedő és szalaszthatatlan lehetőségnek tartom, hogy egy ilyen különleges építőmérnöki szerkezettel foglalkozhatok. Mind a kivitelezési sajátosságok, mind a tervezési sajátosságok rendkívül érdekesek és különlegesek.

A téma kiváló lehetőséget nyújt arra, hogy különböző szabványokat, előírásokat és az adott szerkezetre vonatkozó iránymutatásokat egyszerre, külön-külön vagy akár kombinálva alkalmazzunk, mellyel a lehető legkedvezőbb szerkezetet tudjuk megtervezni. Ez legyen akár gazdasági, akár szerkezeti viselkedési szempont.

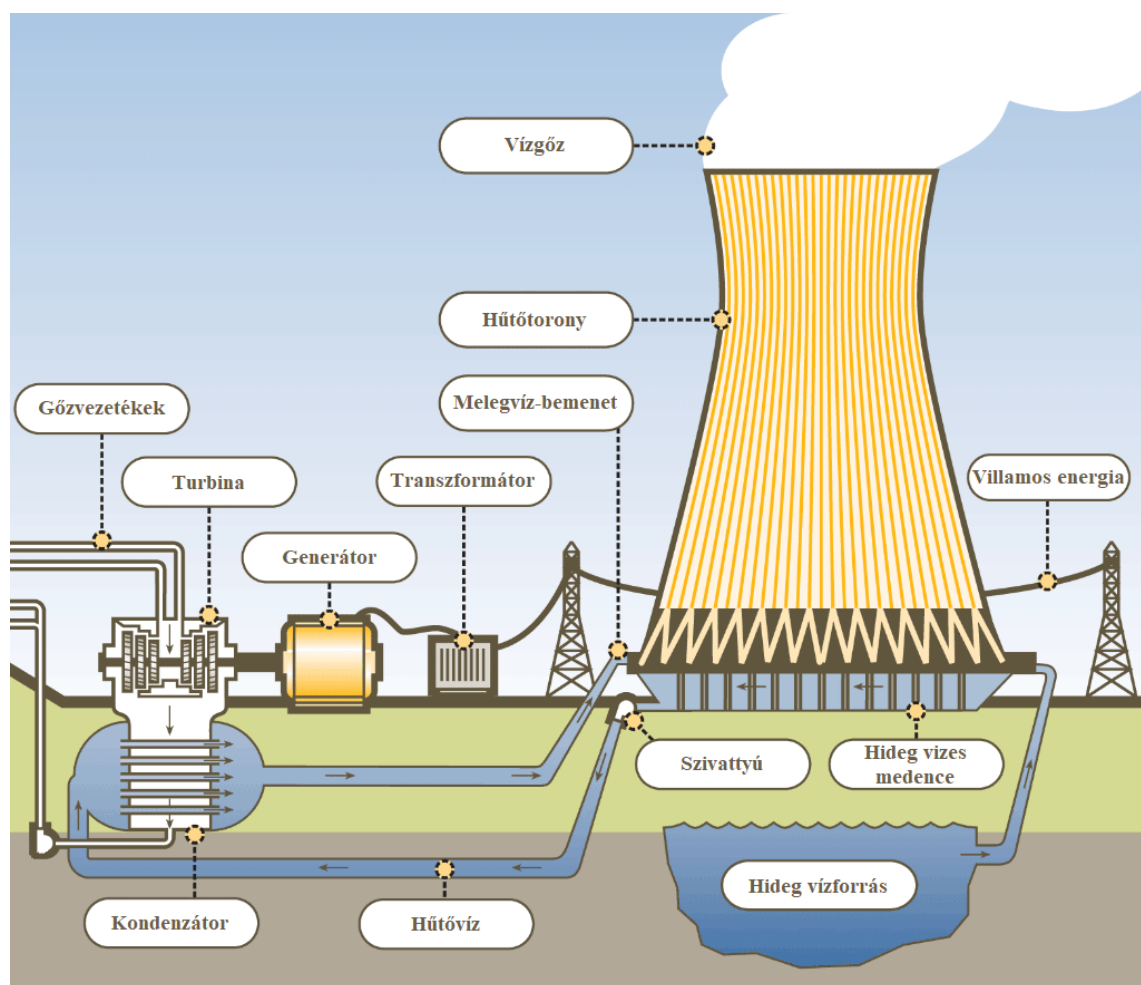
A TMDK dolgozat megfelelően összefoglalja a hűtőtornyok működési elvét, fajtáit és azok szerkezeti kialakításait. A dolgozat első felében részletesen ismeretem a száraz-, illetve nedves elven működő hűtőtornyok közötti különbségeket. Ezután ismertetem a vasbeton-, acél-, illetve különleges szerkezetű hűtőtornyokat, mely összefüggésbe hozható a hűtőtornyok működési elvével is. Mivel a dolgozat további része a vasbeton szerkezetű hiperbolikus hűtőtornyokat tárgyalja, ezért annak a kivitelezését mutatom be részletesen.

A továbbiakban a vasbeton szerkezetű hiperbolikus hűtőtornyok tervezését ismertetem, az alakmeghatározáson túl, a terhek meghatározásán át, a modellépítésig. A terhek közül a legfontosabb terhet, a szélterhet rendkívül részletesen ismertetem és határozom meg az aktuális geometria függvényében. Továbbá a főbb szerkezeti elemeket (felső peremgyűrű, alsó peremgyűrű, valamint X-lábak) közelítő, az irányelveknek megfelelő módszerekkel ellenőriztem. A közelítő méretezés során meghatározott szerkezeti elemeket és az alakmeghatározást felhasználva VEM-modellt építettem, melyet felhasználva ellenőriztem a torony stabilitását.

2. A hűtőtornyok fontossága, elvi működése, a kialakítási lehetőségek bemutatása és azok kivitelezése

2.1. A hűtőtornyok működési elve

Általánosan elmondható az, hogy az ipari folyamatok túlnyomó részében hulladékhő keletkezik. Ez különösen érvényes a hőerőművekre, ahol a gőzturbinában munkát végzett gőz kondenzációjából ered tetemes hulladékhő. A hűtőtornyok olyan szerkezetek, amelyekben a kondenzációs körből származó felmelegített vizet a hőcserélő felületen keresztül levegő vagy víz segítségével lehűtik (1. ábra).



1. ábra: A hűtőtornyok működési elve (researchgate.com, Peng Zhang, 2020)

Ahogy az 1. ábra is mutatja, a folyamat lényege tulajdonképpen az, hogy az erőmű gőzturbinájából kilépő fáradt gőzt, vákuum-gőzt hideg víz befecskendezésével kondenzálják, cseppfolyósítják. A még meleg víz az apróbordás hőcserélőbe kerül, ott lehűl és zárt hűtőkörben elpárolgás nélkül újból hasznosíthatóvá válik a folyamat ismétlődésekor [1]. A turbina teljesítményének növelés érdekében a turbinából kilépő

fáradt gőzt nem az atmoszférikus nyomással szemben távolítják el, hanem vákuum alatti, azaz egy üres térbe vezetik. Ezek alapján megállapítható, hogy a gőz folyamatos kondenzálására, illetve a vákuum fenntartására a hőerőművekben ún. hűtőberendezésre van szükség.

Erőművek telepítésénél három fontosabb szempontot kell vizsgálnunk, az üzemanyag, a fogyasztó és a hűtővíz közelségét. A legkézenfekvőbb eset az, ha az erőmű mellett természetes vízforrás található. A természetes vízforrás a hűtővíz szerepét betöltheti, bizonyos feltételek biztosítása mellett. Ebben az esetben csupán annyi történik, hogy a folyóvíz egy részét átvezetik a kondenzátoron, majd a felmelegedett vizet visszajuttatják a folyóba. Azonban ennek az egyszerű megoldásnak korlátai vannak. Bizonyos kutatások megerősítették, hogy a különböző ipartelepek és a közművek hőszennyezése miatt bizonyos folyók (pl.: Rhône ld. 1.kép) hőmérséklete elérte a 44°C-ot [2]. A folyók biológiai viszonyait tekintve megengedhetetlen ekkora hőmérséklet (halpusztulással és túlzott algásodással járhat), ezért kötelezővé tették a víz visszavezetés előtti hűtését.



1. kép: A Cruas atomerőmű a Rhône partján (qubit.hu, Michel Gunther/Biosphoto, 2019)

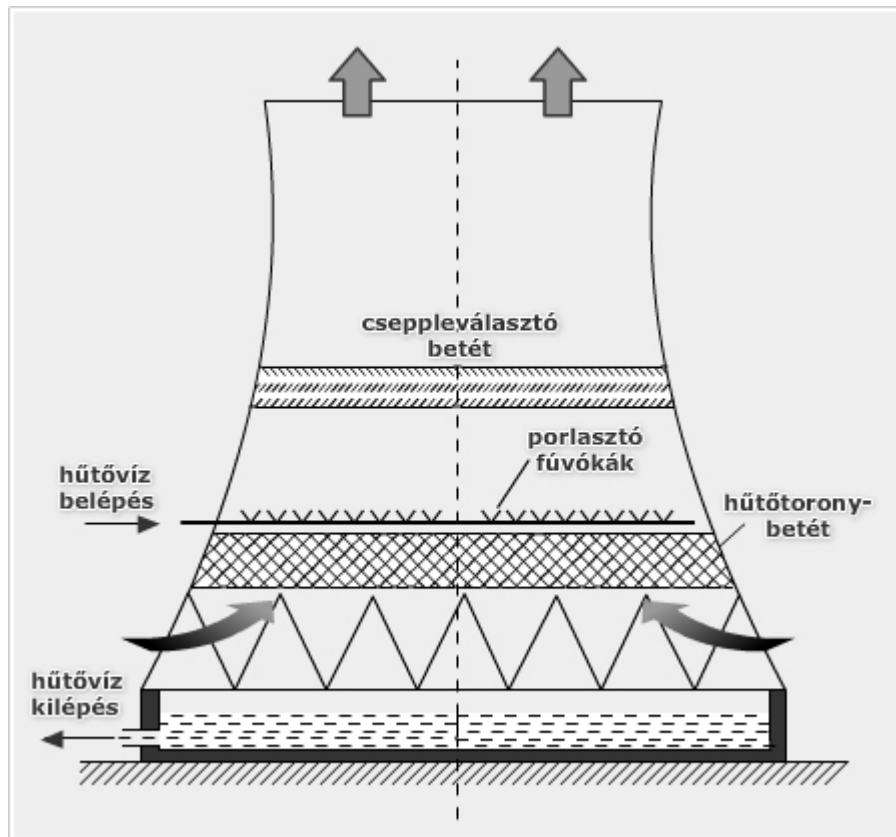
Abban az esetben, ha nincs a közelben megfelelő kapacitású folyó vagy tó, akkor szükség van hűtőtoronyra. Ebben az esetben a meleg vizet levegővel hűtik, a hűtővízzel érkező hulladékhőt az atmoszférának adják át, majd a lehűtött vizet visszavezetik az erőműbe. Azonban a hűtéshez folyamatos légáramlás szükséges, amely több különböző módon érhető el (bővebben az 2.2 alpontban).

2.2. A hűtőtornyok fajtáinak áttekintése

A hűtőtornyok közötti legnagyobb különbség a működési elv. Összességében két csoportot különböztetünk meg, a nedves és a száraz elven működő hűtőtornyokat. A torony két fajtája elkülönül, azonban egy közös tulajdonsággal tudjuk mind a két típust jellemezni, ez a jellemző pedig a huzat (légáram). A nedves elven működő hűtőtorny is lehet természetes (3. ábra) -, illetve mesterséges huzatú (3. kép), illetve a száraz elven működő hűtőtorny is lehet bármely a kettő közül.

2.2.1. A nedves elven működő hűtőtornyok bemutatása

A nedves elven működő tornyok fő jellegzetessége az, hogy a hőátadás elsősorban párologtatással történik és a hideg hűtővíz a torony lábai alatt egy medencében gyűlik össze (2. ábra).



2. ábra: A természetes huzatú nedves hűtőtorny elvi működése (sumimagazin.com, Pester Béla, 2021)

A torony tetején távozó és párával telített levegőből a hideg környezetben kicsapódik a gőz, ezért jelennek meg a hűtőtornyok felett az ún. felhőszerű képződmények (2. kép). Elmondható az, hogy a nedves tornyoknak viszonylag nagy a párolgás miatti vízvesztesége és viszonylag gyakran előfordul, hogy még ennek a pótlására sem áll rendelkezésre elegendő víz az erőmű közvetlen környezetében.



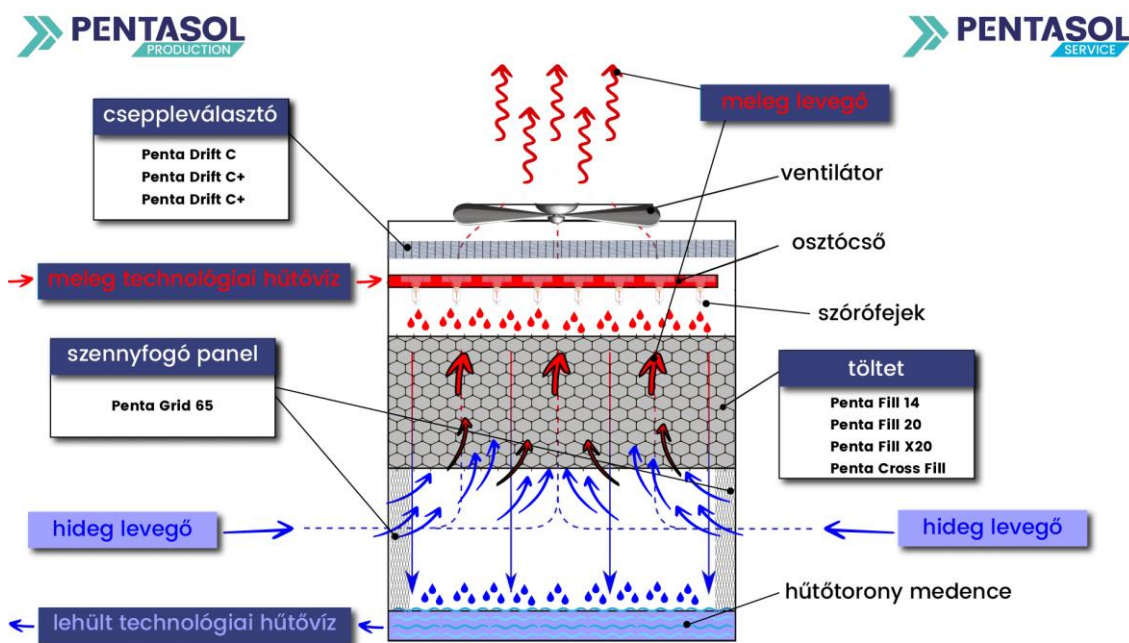
2. kép: A hűtőtoronyból távozó párával telített levegő (pixabay.com, Markus Distelrath, 2019)

A természetes huzatú torony működése abban rejlik, hogy a melegvíz hatására a körülötte lévő levegő felmelegszik és kisebb sűrűsége miatt felszáll. Ebben az esetben hasonló huzat alakul ki, mint amilyen egy lakóház kéményében is.



3. ábra: A természetes huzatú nedves hűtőtorony metszete (ou.edu, The University of Oklahoma, 2016)

A mesterséges huzaton alapú hűtőtornyok lényege, hogy a ventilátor alulról felfelé áramoltatja a levegőt, elősegítve a vízben tárolt hő elvonását (4. ábra) [3].



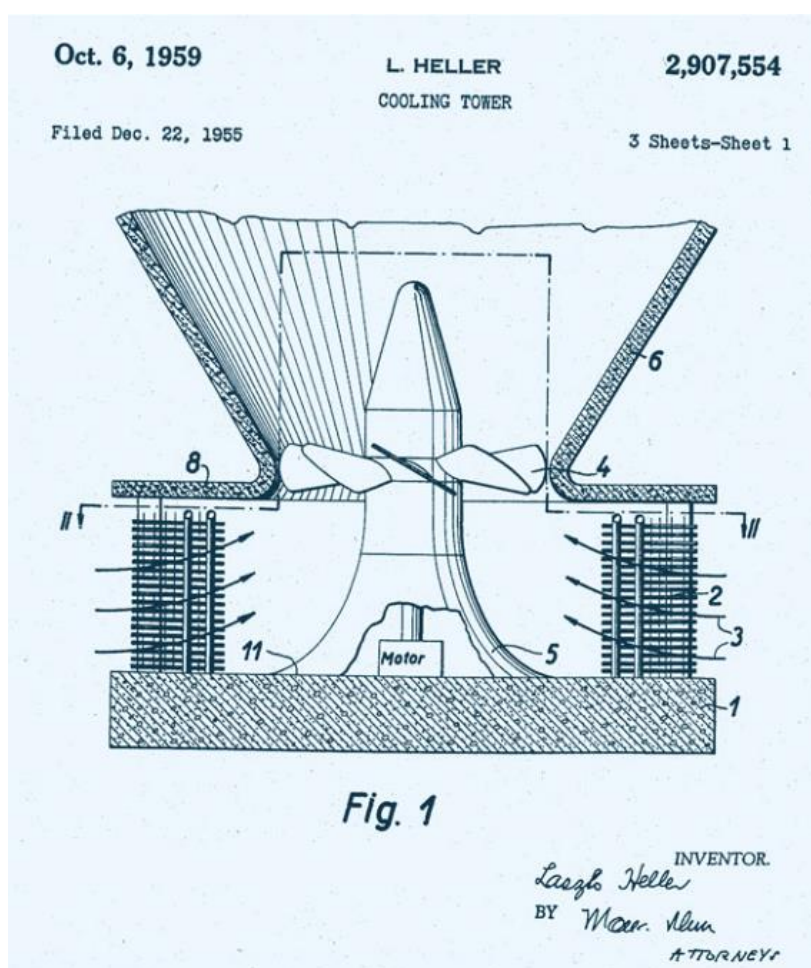
4. ábra: A mesterséges huzatú nedves hűtőtorony elvi működése (pentasol.hu, 2022)



3. kép: A mesterséges huzatú nedves hűtőtorony metszete (sinobaler.com, 2023)

2.2.2. A száraz elven működő hűtőtornyok bemutatása

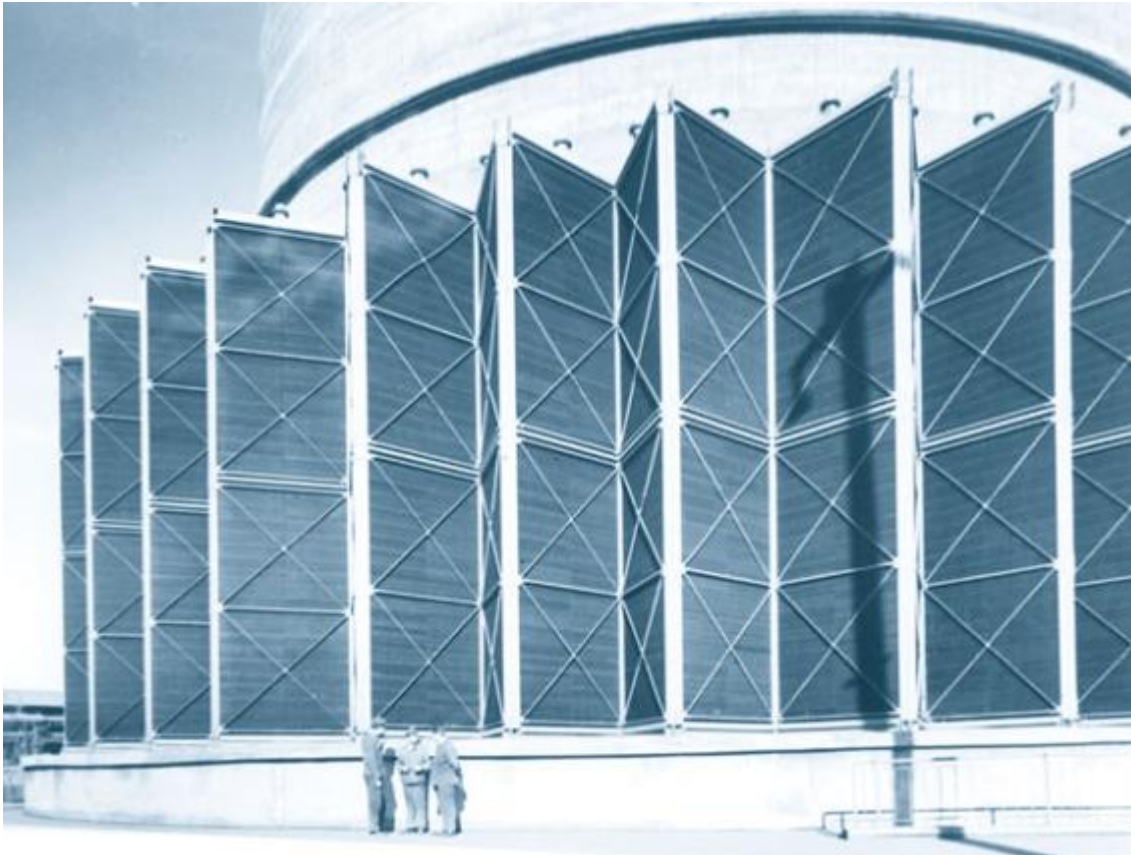
A száraz elven működő hűtőtornyban, amelyet a magyar feltaláló (Heller László) után gyakran Heller-toronynak (5. ábra) is neveznek, a melegvíz bordázott-csöves radiátorokban áramlik. A bordázott-csöves radiátorok kifejlesztésében végzett világszerte elismert munkát dr. Forgó László. A Heller-Forgó-féle légkondenzációs hűtőberendezés tehát két Kossuth-díjas magyar mérnök találmánya. Tulajdonképpen ez egy olyan közvetett légűtéses rendszer, melyben a kondenzátor víz hűtőközegének visszahűtése zárt rendszerben, vízvesztésektől mentesen, levegővel történik (5. kép). Ez a találmány az, amely megoldja a hőerőművek addigi nagy hűtővízszükségletének problémáját [4].



5. ábra: A hűtőrendszert bemutató ábra Heller egyik külföldi szabadalmi kérelméből (L. Heller, 1959)

A fentieket összegezve a légűtéses erőmű-kondenzátor elvét Heller dolgozta ki az 1940-es években, de a rendszer kritikus elemét, az apróbordás hőcserélőt Forgó alkotta meg az 1950-es évek elején. Heller olyan levegőkondenzátort talált ki, amelyben a fáradt gőzt nagy tisztaságú hűtővízzel csapattják le – ennek eredményeként forró víz keletkezik, majd azt megfelelő hűtés után újra fel lehet használni részben az erőmű kazánjánál, részben pedig hűtővízként [1].

Forgó találmánya az említett megfelelő hűtésről gondoskodott: az apróbordás hőcserélő (4. kép) tulajdonképpen alumíniumlemezekből ügyesen kialakított bordák sorozata volt, melyekkel a hűtővízcsöveket borították. A hűtőbordák nagy hőmennyiséget tudtak átadni a levegőnek, és kialakításuk egyfajta természetes huzatot is létrehozott. A bordákkal ellátott hőcserélő elemeket nagy hűtőtornyok lábai köré helyezték cikkcakkban, egymással 60° -os szöget bezárva, mert így működtek a leghatékonyabban [1].



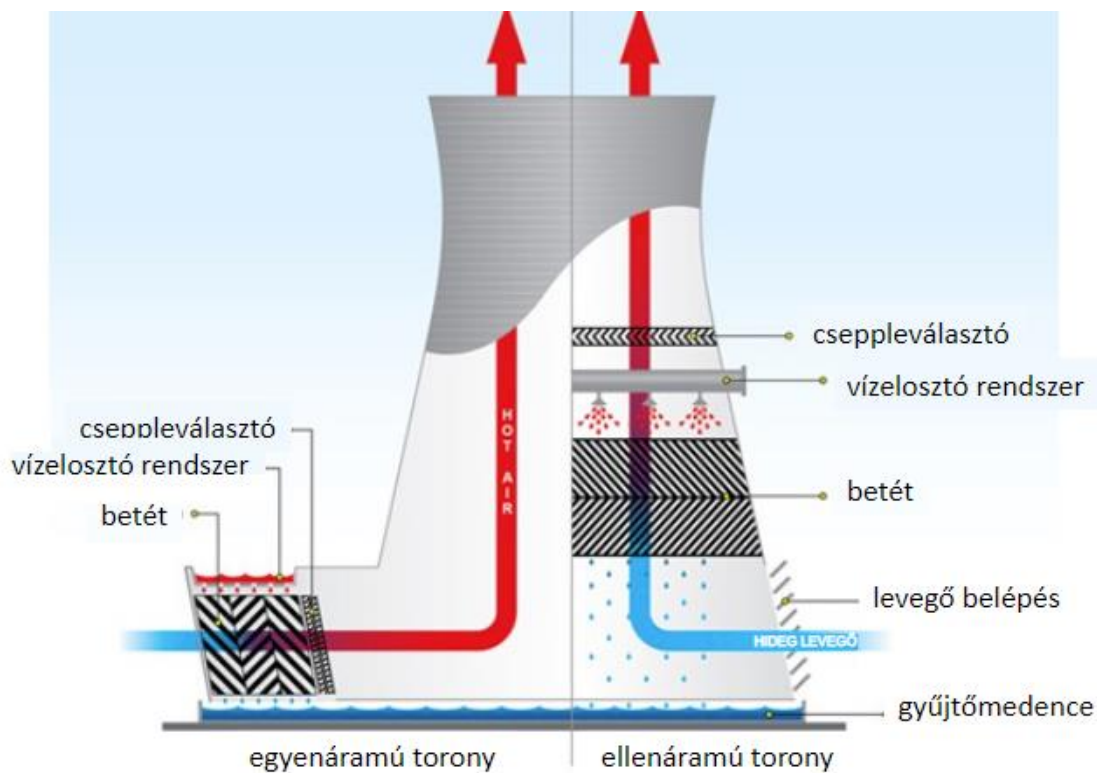
4. kép: A Forgó-féle apróbordás hőcserélők (omikk.bme.hu, 2018)

A hűtőlevegőről részben a torony hengeres – hiperbolikus formájából következő kéményhatás gondoskodott, részben pedig külön ventilátorok. A Heller-Forgó-féle hűtőrendszer nagy előnye a zárt kialakítás volt: a rendszert egyszer kellett feltölteni vízzel és a veszteségmentessége miatt nem is igényelt további utántöltést. Ezzel az erőművek gazdaságosabbá és könnyebben telepíthetővé váltak [5].



5. kép: Természetes huzatú száraz hűtőtorny (mvmegi.mvm.hu, 2021)

A hűtőtornyokat még egy tulajdonságuk alapján lehet osztályozni, ez a hőcserélők elhelyezkedése (6. ábra). A rendszer ellenáramú, ha a hőcserélők a torony belsejében helyezkednek el, és keresztáramú, ha pedig a tornyon kívül helyezkednek el.



6. ábra: Egyenáramú és ellenáramú torony (mvmegi.mvm.hu, 2021)

2.3. Hűtőtornyok kialakítási lehetőségeinek bemutatása

Hűtőtornyokat túlnyomó részben vasbetonból és acélból készítenek. Az anyaghasználat (vasbeton vagy acél) főként függ a hűtőtorny gépészeti működési elvétől (száraz vagy nedves), a környezeti lehetőségektől (vízforrás), illetve a technológiai fejlettségtől az adott területen. A hűtőtornyok fő szerkezeti részei: alapgyűrű és kelyhek, torony lábszerkezete, hőcserélők és annak tartószerkezete, vízgyűjtő medence (csak nedves toronynál), toronykürtő.

2.3.1. Acélszerkezetű hűtőtornyok

Acél toronyszerkezetet gyakran alkalmaznak, különösen száraz hűtőtornyoknál (6. kép). A száraz hűtőtornyoknál nem jelenik meg párolgás, így nem kell az acélszerkezetek korróziójától tartani. Az ilyen típusú tornyok esetén a kürtő rudakból kialakított háromszög-hálózatból áll. A háromszög alakú építési egységeket a helyszínen (7. kép), a torony mellett, a talajon hegesztik össze, majd alumínium trapézlemez burkolattal látják el (8. kép). Ezután a burkolattal együtt emelik a helyére és hegesztik a többi, szomszédos egységhez. Súlyát tekintve az acél szerkezetű torony a kedvezőbb a vasbetonhoz képest, mivel a teljes szerkezet súlya alig több, mint a vasbeton szerkezetű torony köpenyében elhelyezett betonacél mennyisége (a tapasztalatok szerint).



6. kép: Acélszerkezetű hűtőtorny (Dr. Pálfalvi Dóra, 2018)

A 6. kép jól mutatja, hogy a torony tartószerkezete acél, melyet alumínium trapézlemez borítással láttak el. A szerkezet háromszög-hálózata (7. kép) vízszintes és átlós (diagonális) helyzetű rudakból áll. A rudakat több, egymáshoz hegesztett térbeli rácsostartó (négyövé osztott szelvényű rúd) alkotja, melyekből felépülő háromszög hálózat az alsó részen kónikus, felül pedig henger alakú (8. kép). A torony megfelelő merevségét a merevítőgyűrűk biztosítják, melyek kizárólag a torony hengeres részén helyezkednek el. Az elsődleges tartószerkezetet egy vasbeton alapgyűrű támasztja alá.



7. kép: Acél szerkezetű hűtőtorony háromszög hálózata (Xilinhaote, Dr. Pálfalvi Dóra, 2012)

Az acél szerkezetű torony másodlagos tartószerkezetei közé sorolhatjuk a torony alsó kiszélesedését és a teljes trapézlemez burkolatot tartó szelemenrendszert. A kiszélesedés sugárirányban álló rácsos tartószerkezete a hűtődelták nagyobb és a hengeres elsődleges vázszerkezet kisebb átmérőjű közötti lefedés alátámasztására szolgál. A rácsostartókat az X-lábakra támasztjuk vissza.

A trapézlemez burkolat megtartására vízszintes síkú szelemenrendszert helyeznek el, melyek a diagonális rudakra és a kiszélesedés rácsostartóira támaszkodnak. A szelemenek „könyökös” kialakításúak, csökkent ezzel a szükséges keresztmetszeti méretet.



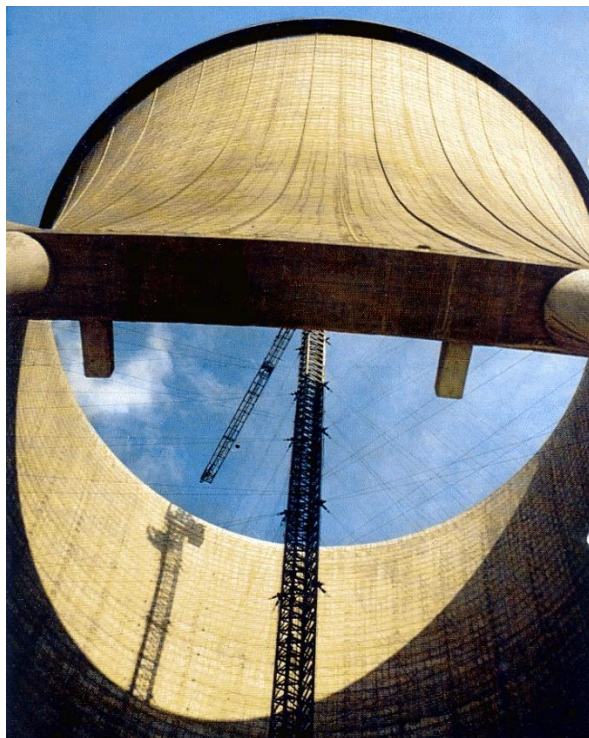
8. kép: Elkészült acél szerkezetű hűtőtorny (Deir Ali, Dr. Pálfalvi Dóra, 2016)

Ezekre a vízszintes síkú szelemenekre támaszkodik az alumínium trapézlemez burkolat, amely többtámaszú kialakítású.

2.3.2. Vasbeton szerkezetű hűtőtornyok

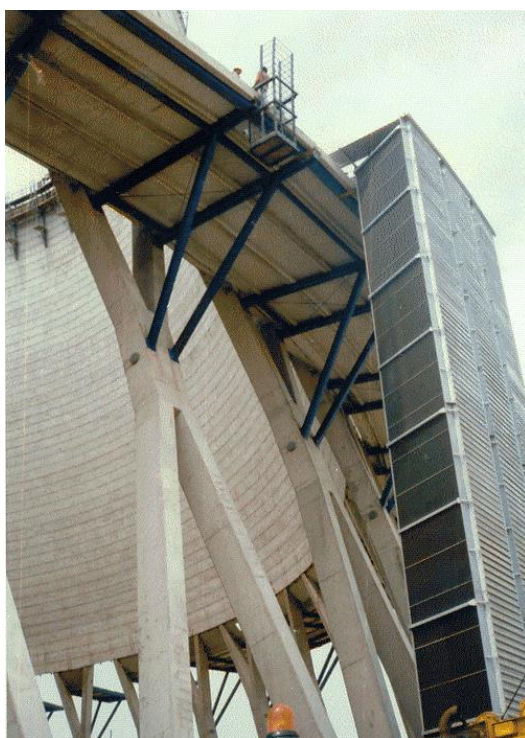
A hűtőtornyok alapozása, illetve a nedves tornyok vízgyűjtő medencéi szinte kivétel nélkül monolit vasbeton szerkezetűek (9. kép). Az alaptest az egyszerűség kedvéért egy folyamatos gyűrű, melynek alapsíkja többnyire vízszintes. Az alapgyűrűhöz szorosan kapcsolódnak a kelyhek, melybe a lábakat beállítják és a ferde helyzetet biztosítják a köpeny építése során.

A lábszerkezet előregyártott, ami rendszerint a helyszínen történik. Alapvetően két-féle típus terjedt el, az „X” és a „V” alakú lábazat. Ezen lábak típusának megválasztásáról akár fel is lehet ismerni egy adott hűtőtorny működési elvét. Az „X” láb a magasabb nyílás biztosítására szolgál, mely nagyobb bejutó légáramot biztosít a torony belsejébe, ilyenre van szükség a száraz elven működő hűtőtornyoknál. Jellemzően „V” alakú lábat inkább nedves elven működő hűtőtornyoknál alkalmaznak.



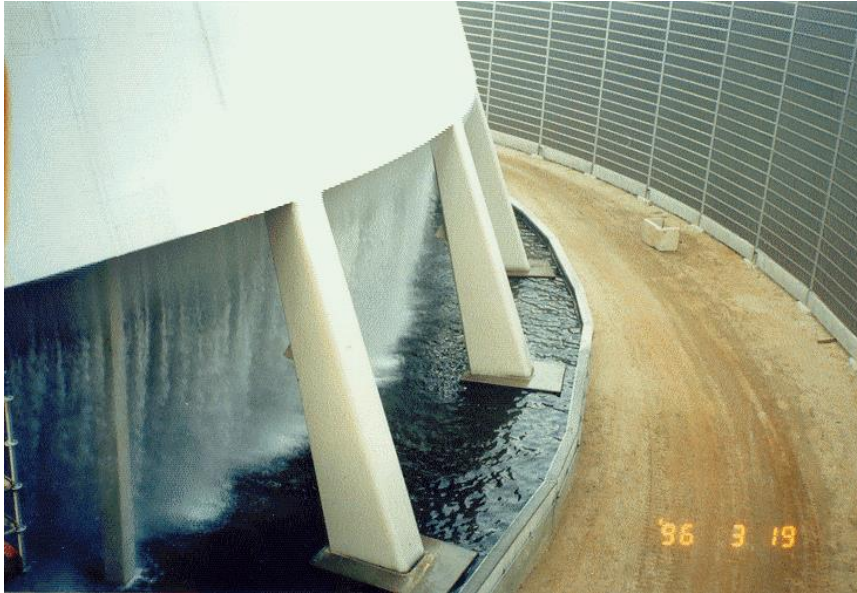
9. kép: Elkészült vasbeton szerkezetű hűtőtorony (Németország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2014)

Heller hűtőtornyok esetén a hőcserélőket (másnéven a hűtődeltákat) leggyakrabban a lábazat körül kialakított acélszerkezet tartja (10. kép). Általában itt található a bejárat a torony belsejébe és szintén itt helyezkedik el az acélszerkezetű lépcsőház is. A nagyméretű léghűtők magas falként veszik körül a hűtőtorony alsó beáramló nyílását. A léghűtők felett az ún. kiszélesedés gondoskodik a levegő bevezetéséről.



10. kép: Kiszélesedés, X-lábak és a hűtődelták kapcsolata (Törökország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2014)

Nedves elven működő hűtőtornyok esetén a hőátadó felület tornyon belüli elhelyezkedése szokásos. Itt a hőátadást többnyire sűrűn egymás mellé helyezett lemezek segítik elő, melyekre felülről szórják rá a vizet, a levegő pedig alulról felfelé áramlik a lemezek között. A lemezekről a víz lecsepeg a vízgyűjtő medencébe (11. kép).



11. kép: Nedves elven működő hűtőtorny vízgyűjtő medencéje (Schkopau, 1996)

Statikai szempontból az ún. kétszeresen görbült felületek alkalmazása a kedvező, mert ezek a héjszerkezetek lényegesen stabilabbak, mint az egyszeresen görbültek. Ez az oka annak, hogy a természetes huzatú hűtőtornyok köpenye rendszerint forgáshiperboloid felület, nem pedig kúp vagy henger. Ha nem forgáshiperboloidot alkalmaznak, akkor célszerű a felületet több, egymástól eltérő szakaszra bontani. Így például az alsó rész lehet kúpos, a felső rész pedig hengeres, a kettő között megfelelő átmenettel (ld. 12. kép).



12. kép: Inotai erőmű hűtőtornyai (google.com, 2021)

2.3.3. Különleges szerkezetű hűtőtornyok

Különleges szerkezetű hűtőtorny építésével az elsők között Németország próbálkozott. 1976-ban kábelszerkezetű tornyot építettek (13. kép). A három irányban futó kábelek közül kettő egymást ferdén keresztezve a hiperbola egyenes alkotói irányában, a harmadik meridián irányban fut. A torony közepén egy vasbeton oszlopok építettek, melyre függesztették a köpenyt hordozó merevítő gyűrűt. A kábelszerkezet innen indult és az alaphoz volt lehorgonyozva. A kábelszerkezetű köpenyt belülről alumínium hullámlemezzel burkolták. Sajnos ezt a kábeltornyot később elbontották, mivel üzemben kívül helyezték azt az atomerőművet, amelynek hűtésére szolgált volna ez a torony. A kábeltornyok elterjedését a kábel magas ára is akadályozza.



13. kép: Megépült kábeltorony, még burkolat nélkül (Németország, 1992)

2.4. Vasbeton szerkezetű hűtőtorony kivitelezése

Mivel a TMDK dolgozatomban további részében főként vasbeton szerkezetű hűtőtoronyról lesz szó, ezért csak annak kivitelezését részletezem.

Vasbeton szerkezetű hűtőtorony építése földkiemeléssel kezdődik olyan mélységig, ahol már a talaj teherbírása elegendő. A munkagödörtől a felszíni vizeket távol kell tartani, ezért a kialakított rézsúk tetejét töltéssel kell ellátni, míg a rézsúk lábánál vízelvezető árkot kell készíteni. A munkagödörben az utolsó 1,50 - 2,00 m föld kiemelése előtt szádfalakat vernek a földbe, és csak ezután emelik ki a földet. Így elérhető, hogy az alapgyűrű mellett lévő föld nem lazul fel, és ellenállása nem változik a kezdeti állapothoz képest.

Ezután szerelőbeton készül, hogy az alaptest acél armatúráját könnyebb legyen szerelni, majd kiöntik betonnal. Erre kehelyalapokat alakítanak ki a lábak megfogására. Az alaptesthez csatlakoznak szárnyfalak, amelyekre a hűtődelták alaplemeze támaszkodik.

A szokásos megoldás az, hogy az alapgyűrű készítésével párhuzamosan legyártják a lábakat is. Ez történhet a torony mellett kívül vagy a tornyon belül (14. kép), vízszintes vagy akár ferde (beállított) helyzetben is, kézi zsaluzással és a szükséges szerelvények elhelyezésével.



14. kép: Az "X" lábak vasszerelése vízszintes helyzetben (Törökország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2016)



15. kép: "X" lábak a végleges helyzetükben (Törökország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2012)

A lábakat ezt követően autódaru emeli a helyére. Miután rendkívül nagy súlyokról van szó, ugyanakkor rendkívül fontos a pontos beállítás, csak a lábak szereléséhez külön megtámasztó és beállító szerkezetet szükséges alkalmazni (15. kép). Ha a rendelkezésre álló autódaru teherbírás nem megfelelő, akkor megoldás lehet, hogy csuklót betonoznak a kehely falaiba, illetve a lábakba. Ebben az esetben a daru forgatja végleges pozícióba a lábakat. Az álló lábak felső végét folyamatos gyűrűvel fogják össze, mely tulajdonképpen a köpeny indítószerkezete is (16. kép). A gyűrűgerenda elkészítésétől számított két hétig a lábakat ideiglenesen ki kell támasztani. A köpeny induló vastagsága minimum akkora, mint a láb mérete, mely a magasság mentén folyamatosan lecsökken.



16. kép: A köpeny indításának kizsaluzása (doka.com, 2022)

A kivitelezés egyik fontos segédeszköze a toronydaru, melyet általában az építendő torony közepében állítanak fel (17. kép). A toronydaru két szerkezeti része a függőleges oszlop és a közel vízszintes gém. A toronydaru gémjének hosszát a köpeny sugara határozza meg, teherbírását pedig az emelendő tömeg.



17. kép: Toronydaru elhelyezkedése a torony közepében (doka.com, 2022)

A fejlődő országokban (pl. Kínában) gyakran probléma a toronydaru biztosítása, hiszen ez a hűtőtorony egész építési ideje alatt rendelkezésre kell, hogy álljon. Erre a problémára megoldás lehet, például egy magas acélszerkezetű oszlop építése a torony mellett, amely mentén a munkaasztal csörlővel mozgatható, de ez csak egy irányban teszi lehetővé a köpeny megközelítését, építését.

A köpeny betonozása csúszózsályuzattal vagy táblás zsályuzattal készülhet. Erre egy jó rendszert fejlesztett ki a DOKA (18. kép). Ez a rendszer egy teljesen önkuszó nagytáblás zsályu, mely maximális biztonságot nyújt a munkásoknak minden munkafázisban, mivel folyamatosan az építményhez van rögzítve. A zsályuzati rendszer egy rendkívül gazdaságos megoldást kínál, mert a körbefutó állványok lehetővé teszik több munkafolyamat egyidejű végzését. Ezeken felül pedig gyors munkavégzést biztosít, mivel a nagytáblás zsályuegységek kezelése és tisztítása egyszerű, illetve az állvány dőlésszögének állítása egy központi orsóval megoldható [1].



18. kép: Az SK 175 hűtőtorony zsaluzata (doka.com, 2023)

Fontos megemlíteni, hogy a hűtőtorony alakját bizonyos mértékig meghatározza az alkalmazott zsaluzási technika. Ha a zsalutábák egymáshoz képest vízszintesen elmozdulhatnak, vagyis átfedés lehetséges, betonozás közben felfelé haladva a felület kúposítható vagy bővíthető. A zsaluzat gépészeti részei azonban korlátozzák a kúposítás mértékét.

Az acélszerkezetű kiszélesedésre való feljutást acél szerkezetű lépcsőház biztosítja (19. kép). A lépcsőház a tornyon kívül is elhelyezkedhet, ekkor a feljutás közvetlen. Illetve a tornyon belül is elhelyezkedhet, ekkor ún. kibúvót kell létesíteni a torony köpenyén, hogy ki lehessen jutni a kiszélesedésre. A kiszélesedés csőkorláttal van ellátva, tetejéről a hűtőtorony felső pereménél lévő járdára lehet feljutni.



19. kép: Acél létra a kiszélesedés tetején (Dr. Pálfalvi Dóra, 2016)

A köpeny építésének több kritikus kérdése van, de ezek közül a legfontosabb a köpeny függőleges tengelyének és a forgásszimmetrikus alakjának biztosítása. Ezért egyrészt folyamatos geodéziai méréseket végeznek, másrészt pedig a zsaluzatot sugárirányú kötélzettel és folyamatosan változtatható átmérőjű merev gyűrűvel egészítik ki, amely a toronydarura nem terhel.

A köpeny merevítésére külső vízszintes merevítő gyűrűt alkalmaznak. Általában erre elegendő az a járda, ami a torony legfelső szintjén helyezkedik el. Ez a járda arra szolgál, hogy a toronyra szerelt akadályfény-rendszert karban lehessen tartani. A köpeny elkészülte után leszerelik a zsaluzatot és elbontják a toronydarut. Nedves torony esetén a belső felületet utólag víztaszító festékkel vonják be, nehogy a vízgőzzel telített levegő korróziót okozzon. Száraz toronynál erre nincsen szükség, mivel a víz a levegőtől elválasztva csövekben áramlik.

A hűtőtorony építési ideje függ a méretektől, illetve a munka intenzitásától. A hűtőtorony bekerülési költsége nem változik lényegesen attól függően, hogy vasbetonból vagy acélból készül. Ez azt támasztja alá, hogy a tervező szabadon dönthet a hűtőtorony konstrukció kérdésében, mivel nem az ár, hanem az építető szempontjai a mérvadóak.

3. A tervezéshez szükséges kiindulása adatok

A hűtőtornyok geometria méretei legfőképpen a gépészeti adatoktól függenek. Mivel a vasbeton hűtőtornyok geometriája, kialakítása és méretezése teljesen eltér az acél hűtőtoronyétól, ezért egy már megtervezett acél hűtőtorony alapadatait használom fel a tervezés során (1. táblázat).

3.1. Geometriai és a torony főbb méretei

	Hűtőtorony adatai
Torony teljes magassága	+ 120 m
Torokkör sugara	27,0 m
Héj alsó síkja	+22,0 m
Alapgyűrű felső síkja	-3,0 m
Delta magassága	18,0 m
Deltaláb magassága	2,0 m
Deltaláb külső átmérője	92,52 m
Delták száma	102 db

1. táblázat: Az acél és vasbeton hűtőtorony főbb adatai

3.2. Méretezés alapelve

A statikai számítások az Eurocode szabványsorozat, a VGB-Guideline (VGB-R 610 e) 2010 ajánlásai és az általánosan elfogadott mérnöki megfontolások alapján készülnek.

3.3. VGB-Guideline, szabványok

A TMDK dolgozat elkészítéséhez felhasználok a „VGB-Guideline on the Structural Design, Calculation, Engineering and Construction of Cooling Towers (VGB-R 610 e)” ajánlásait, illetve a következő szabványokat (2. táblázat):

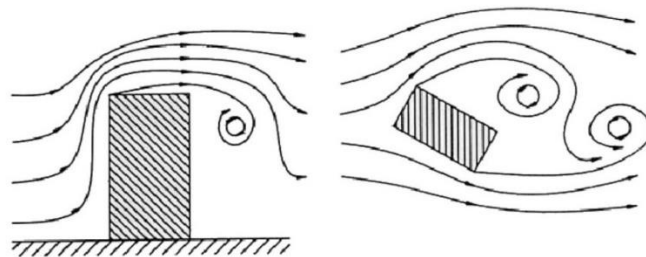
MSZ EN 1991	Eurocode 1: A tartószerkezetek tervezésének alapjai és a tartószerkezetet érő hatások
MSZ EN 1992	Eurocode 2: Vasbetonszerkezetek tervezése
MSZ EN 1993	Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése
MSZ EN 1998	Eurocode 8: Tartószerkezetek földrengésállóságának tervezése

2. táblázat: A felhasznált szabványok

3.4. A Ferrybridge-i katasztrófa (1965) vonatkozása

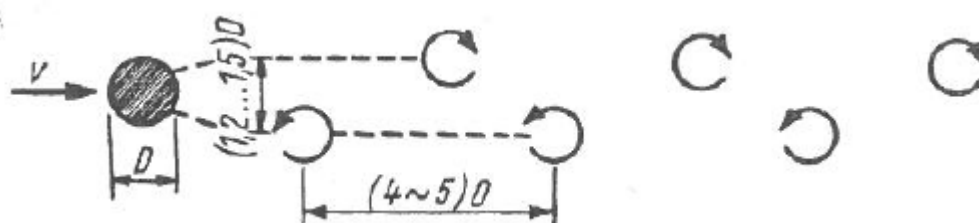
Általánosan a szélteherről: A szélteher egy speciális teher, mert sok mindentől függ. Így például a szél erősségétől, a szél irányától, a vízszintes iránytól való eltéréstől, a szélleőkés periódusától, a térszíntől való magasságtól, a terep beépítettségétől, a széltámadott építmény alakjától és felülete érdességétől, rugalmasságától stb. Egy furcsa jelensége a szélnek, hogy magasság irányban rétegezett, azaz 30-40 m vastag rétegekben fúj, és a különböző rétegeknek mások a tulajdonságai, és a szél nemcsak a saját irányában okoz terhelést, hanem arra merőlegesen is. Ezenkívül a legtöbb széltulajdonság valószínűségi változó. Ezeket a tulajdonságokat lehetetlen pontosan figyelembe venni, ezért az egyes szabványok, előírások, szabályzatok egyszerűsítéseket vezetnek be, amikkel a méretezés biztonságosan elvégezhető [5].

Szél örvénylése: A különböző építmények a szél örvénylését okozzák. Az örvénylésnél a szél sebessége megnő, és az addig lamináris légáramlás turbulenssé válik. A széltámadta építmények mögött lép fel a rendszerint nem szimmetrikus örvényhatás (7. ábra) [5].



7. ábra: A szél örvénylése (linkedin.com, Arvind JS, 2023)

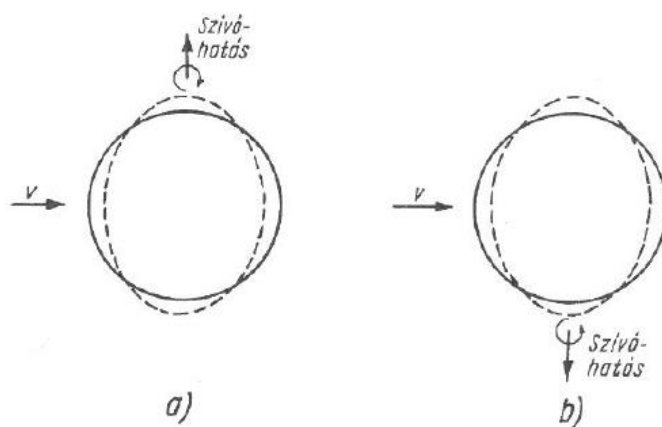
Örvényleválás: A szélnek nem csak saját irányában van örvényhatása, hanem keresztirányban is. Ez az ún. Kármán-féle örvényhatás (8. ábra). Ahogy a szél körülöleli a hengerszerű testet (az bármilyen lehet, nemcsak kör), mindkét oldalon örvény válik le. A különböző véletlen hatások miatt azonban a leválás nem egyszerre történik, hanem felváltva. Az örvényleválás állandó szélesebbesség mellett is bekövetkezik.



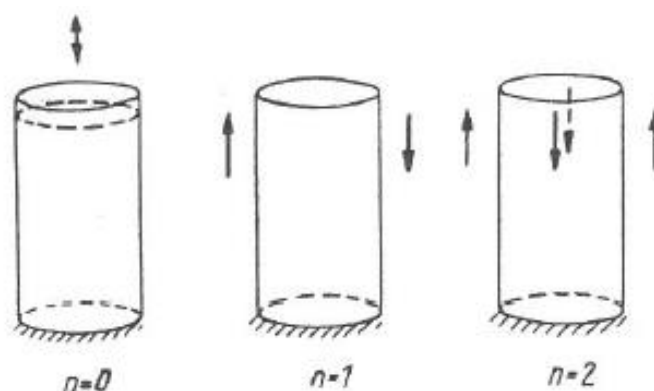
8. ábra: A Kármán-féle örvények leválása (Kollár Lajos, 2004)

Ovalizálódás: Láttuk, hogy a Kármán-örvények oldalt válnak le, és ezzel vízszintes erőhatásokat adnak át a szerkezetnek. A hengeres építmények rendszerint kis

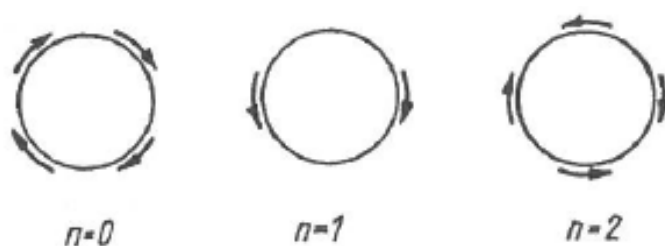
falvastagsággal készülnek, keresztirányú merevségük kicsi. Ezért keresztmetszetük a változó keresztirányú erők hatására deformálódik, az eredeti kör keresztmetszet oválissá válik (9. ábra). Miután az örvényleválás váltakozva következik be, ez a váltokozás a héj szerkezetét rezgésbe hozhatja [5].



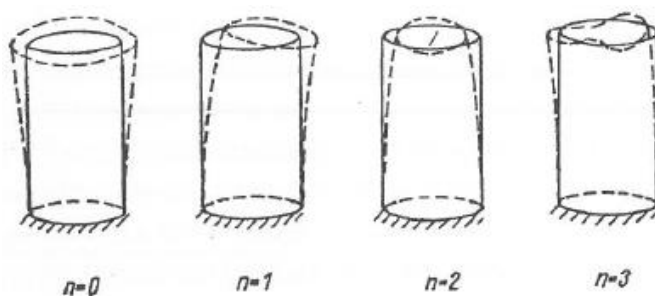
9. ábra: Az örvényleválás hatása (Kollár Lajos, 2004)



10. ábra: Hengerhég longitudinális rezgése (Kollár Lajos, 2004)

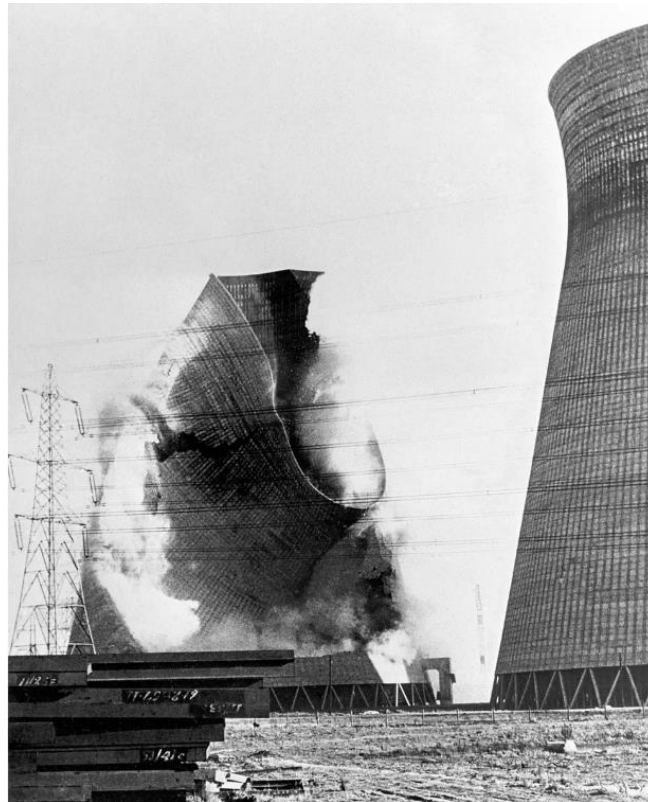


11. ábra: Hengerhég csavarási rezgése (Kollár Lajos, 2004)



12. ábra: Hengerhég transzverzális rezgése (Kollár Lajos, 2004)

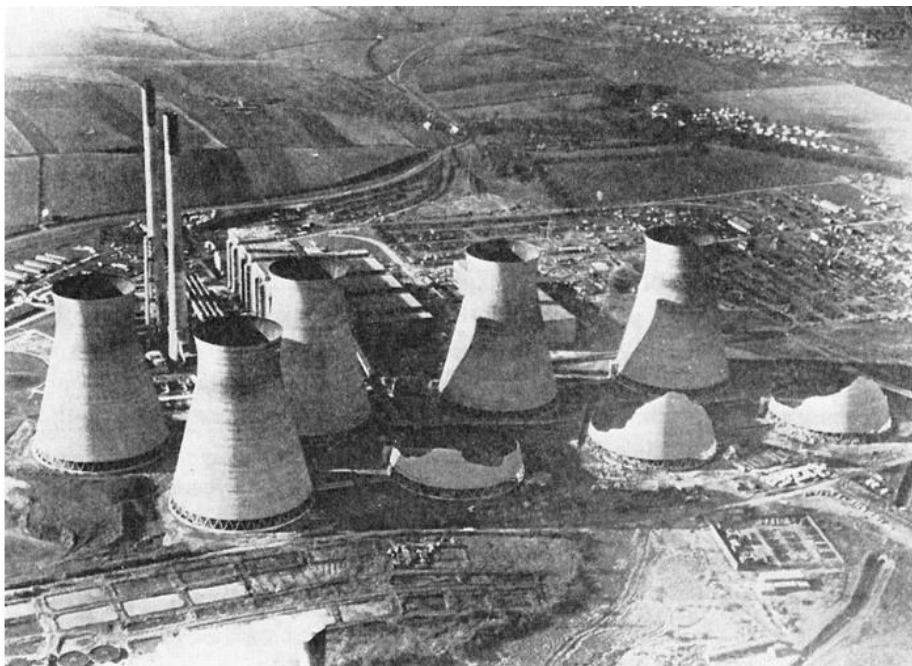
Ilyen ovalizálódó rezgés döntött össze Ferrybrige-ben (Anglia) három nagyméretű hűtőtornyot (20. kép). A tornyok erőteljes lélegzési mozgása egy egész napig tartott.



20. kép: A Ferrybridge-i katasztrófa pillanata (google.com, 2022)

A hűtőtornyok katasztrófája után sokat foglalkoztak azzal a kérdéssel, hogy hogyan lehet elkerülni a nagyméretű hűtőtornyok katasztrofális rezgéseit. Hasonló geometriájú héjakon végzett tanulmányok alapján meghatározták azokat a szempontokat, amikkel a hasonló katasztrófák elkerülhetők. Így pl. megállapították, hogy a hűtőtorny héjának falvastagságát, ill. az esetleges bordázottságát (13. ábra) úgy kell kialakítani, hogy a rezgésfrekvenciájuk egynél nagyobb legyen. Ezen kívül a kettős görbületű héjak falában mindenképp kétoldali acélhálót kell alkalmazni. Megállapították azt is, hogy a felső peremgyűrű (mely amúgy is jó célt szolgál a körüjárás érdekében) erőteljesen növeli a merevséget, és növeli a rezgési frekvenciák [5].

A 21. kép mutatja a hűtőtornyok egymást képesti elhelyezkedését. A tanulmányok során megállapították, hogy a szélteher hatását tovább kell vizsgálni akkor, ha más hűtőtorny vagy más nagyobb épület helyezkedik el a hűtőtorny közelében. A hűtőtorny-hűtőtorny, illetve hűtőtorny-épület interferenciáját részletesebben mutatja a 3.5.2.6 alpont. Az aktuális szabványok, iránymutatások, illetve segédletek folyamatosan bővülnek, ezért fontos a naprakészség ezek tekintetében.



21. kép: A Ferrybridge-i hűtőtornyok a katasztrófa után (google.com, 2023)



22. kép: A Ferrybridge-i hűtőtornyok látképe a katasztrófa után (google.com, 2022)

3.5. Terhek és teherkombinációk

3.5.1. Önsúly

A vasbetonszerkezet súlyát a végelem program (ld. AxisVM X7) a keresztmetszeti adatok alapján automatikusan számítja. A vasbeton sűrűsége a továbbiakban 25 kN/m^3 .

3.5.2. Szélteher

A felületre ható szélterhelés hatásait egyenértékű statikus terhek alkalmazásával kell meghatározni. Meg kell különböztetni a hűtőtorony héjának külső felületére ható w_e szélnyomást és a belső burkolatra ható w_i belső szélnyomást. A hatáskombinációk összefüggésében a W szélterhelés a W_e külső szélnyomásból és a W_i belső szélszívásból származó terhelések legkedvezőtlenebb szuperpozíciójának tekintendő. A szélterhelést 50 éves visszatérési periódussal jellemezhető karakterisztikus terhelésként veendő.

Az alkalmazott egyenértékű statikus terhelés a v_b , szélsébség alapértéke révén tartalmazza a szélleőkés hatását, amely figyelembe veszi a hűtőtorony héjára ható nyomásmező különleges viselkedését és a hűtőtorony szerkezetének különleges teherbírási viselkedését. Az alapot az EN 1991-1-4 szabvány szerinti szélzónatérkép képezi, az ott feltüntetett v_m átlagos szélsébségekkel. A szélterhelést a teljes sebességű nyomással kell figyelembe venni, függetlenül annak irányától. A szélirány befolyását a szélterhelés meghatározásakor figyelembe lehet venni, ha arra vonatkozóan biztosított statisztikai értékek állnak rendelkezésre.

A szélnyomás eloszlását befolyásolja a hűtőtorony felületének érdessége. Az érdességet bordák hozzák létre, amelyek általában a csúszózsálat pilaszterléceként valósíthatók meg.

3.5.2.1. Szélteher meghatározása

A szélsébség értéke jellemzően $v_{b,0}^{3\text{sec}} = 35 \text{ m/s}$ (3 másodperces szélleőkés) Tishreen térségben (Szíria). A szélteher meghatározása (EC1 szerint) a következő módon történik:

Az átlagos szélsébség alapértékét (v_b) a következő képlettel határozzuk meg:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}^{10\text{min}}$$

ahol: $c_{dir} = 1,0$ - iránytényező
 $c_{season} = 1,0$ - szezonális tényező

$v_{b,0}^{10min}$ - az átlagos szélesség kiindulási értéke sík terep felett 10 m magasságban, 10 perces időtartamra.

A torlónyomás alapértékét (q_b) a következő képlettel határozzuk meg:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b$$

ahol: $\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}$ - a levegő sűrűsége
 v_b - az átlagos szélesség alapértéke

A torlónyomás csúcsértékét ($q_p(z)$) a terepszint feletti z magasságban a következő képlettel határozzuk meg:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

ahol: $c_e(z) = c_r^2(z) \cdot c_0^2(z) \cdot [1 + 7 \cdot I_v(z)]$ - a helyszíni tényező

$c_r(z) = k_r \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)$ - az érdességi tényező

$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$ - a beépítettségi tényező

beépítettségi osztály: I. - nyílt terep: szélirányban legalább 5 km hosszú tó; egyenletes sík szárazföldi terület akadályok nélkül

$z_0 = 0,01 m$ - az érdességi hossz a választott beépítettségi osztály szerint

$z_{0,II} = 0,05 m$ - az érdességi hossz a II. beépítettségi osztály szerint

$c_0(z) = 0,05 m$ - a domborzati tényező

$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$ - a szél örvénylési intenzitása

$k_I = 1,0$ - az örvénylési tényező

q_b - a torlónyomás alapértéke

3.5.2.2. Felületi szélnyomás

A külső felületekre ható szélnyomást ($w_e(z, \theta)$) a következő képlettel határozzuk meg:

$$w_e(z, \theta) = c_{pe}(\theta) \cdot q_p(z) \cdot \varphi \cdot F_l$$

A belső felületekre ható szélnyomást (w_i) a következő képlettel határozzuk meg:

$$w_i = c_{pi} \cdot q_p(H) \cdot \varphi \cdot F_l$$

ahol: $c_{pe}(\theta)$ - a külső szélteherhez tartozó nyomási tényező

c_{pi} - a belső szélteherhez tartozó nyomási tényező

$q_p(z)$ - a torlónyomás csúcsértéke

φ - a szél dinamikus tényezője

F_l - interferencia tényező

3.5.2.3. Külső szélnyomás ($w_e(z, \theta)$)

A külső szélteherhez tartozó nyomási tényező $c_{pe}(\theta)$ kerületi eloszlását különböző függvények határozzák meg, különböző szabványok szerint. A VGB-Guideline a betonfelület érdességének megállapítására 6 féle görbét javasol (14. ábra). A leggazdaságosabb görbe a K1.0, ahol a bordák szükséges méretét a következőképpen számítják ki:

A torony külső felületét 72 db függőleges vasbeton borda alkalmazásával érdesítik, egyenként $h_R = 100$ mm sugárirányú vastagsággal, mellyel a szélteher kerületi eloszlása kedvezőbb. A meghatározások szerint a K1.0 görbe így vizsgálható:

$$\frac{h_R}{a_R} = \frac{0,10}{2,3725} = 0,042 \rightarrow \text{K1.0 görbe (3. táblázat)}$$

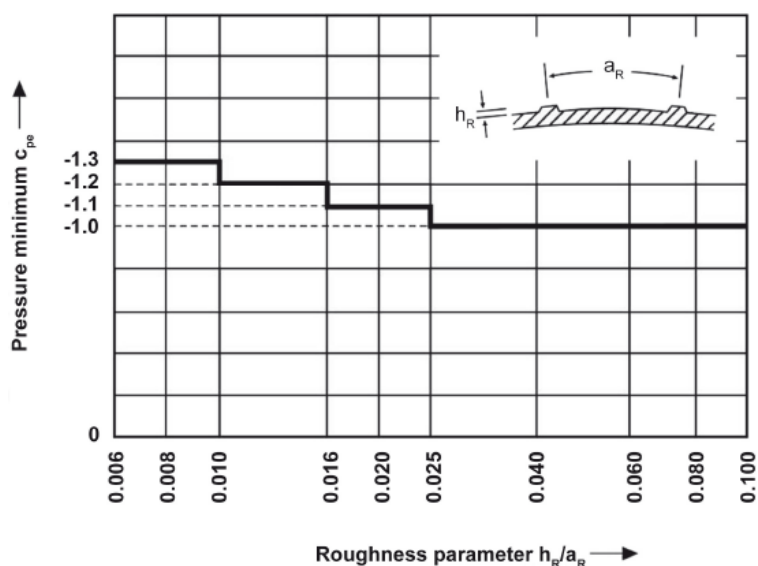
ahol: $h_R = 0,10$ m

- a borda kiemelkedése

$a_R = 2,3725$ m

- a bordák tangenciális távolsága a héj magasságának 1/3-ában

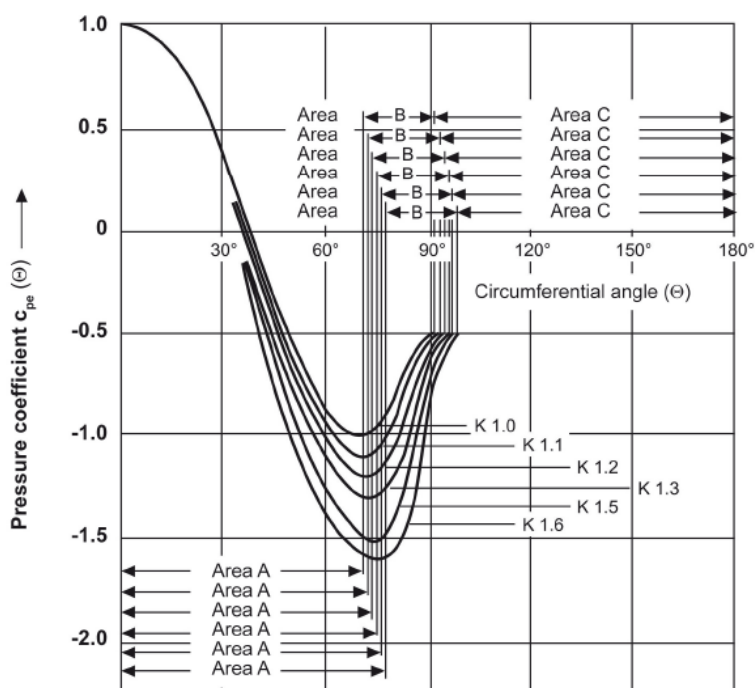
Ezzel a szerkezeti kialakítással azon túl, hogy lecsökkentjük a hengeren lévő hatalmas szíváscsúcsot, egyidejűleg megakadályoztuk a Kármán-féle örvények leválásának szabályosságát, tehát a torony keresztirányú lengését.



13. ábra: A külső nyomásra vonatkozó nyomásminimumok a felületi érdesség függvényében (VGB-Guideline)

Surface	Roughness parameter h_R/a_R	Pressure minimum min c_{pe}	Curve
With ribs	0.025 ... 0.100	-1.0	K 1.0
	0.016 ... 0.025	-1.1	K 1.1
	0.010 ... 0.016	-1.2	K 1.2
	0.006 ... 0.010	-1.3	K 1.3
Without ribs	Off-shutter finish smooth	-1.5	K 1.5
		-1.6	K 1.6

3. táblázat: A kerület menti megoszlás maximális értéke az érdesség függvényében (VGB-Guideline)



14. ábra: A $c_{pe}(\theta)$ kerület menti megoszlás függvényei a VGB szerint (VGB-Guideline)

Curve	Pressure minimum	Area A	Area B	Area C	c_f
K 1.0	-1.0	$0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ $1 - 2,0 \left(\sin \frac{90}{70} \theta \right)^{2,267}$	$70^\circ \leq \theta \leq 91^\circ$ $-1,0 + 0,5 \left(\sin \left(\frac{90}{21} (\theta - 70) \right) \right)^{2,395}$	$91^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ -0.5	0.66
K 1.1	-1.1	$0^\circ \leq \theta \leq 71^\circ$ $1 - 2,1 \left(\sin \frac{90}{71} \theta \right)^{2,239}$	$71^\circ \leq \theta \leq 93^\circ$ $-1,1 + 0,6 \left(\sin \left(\frac{90}{22} (\theta - 71) \right) \right)^{2,395}$	$93^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ -0.5	0.64
K 1.2	-1.2	$0^\circ \leq \theta \leq 72^\circ$ $1 - 2,2 \left(\sin \frac{90}{72} \theta \right)^{2,205}$	$72^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$ $-1,2 + 0,7 \left(\sin \left(\frac{90}{23} (\theta - 72) \right) \right)^{2,395}$	$95^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ -0.5	0.60
K 1.3	-1.3	$0^\circ \leq \theta \leq 73^\circ$ $1 - 2,3 \left(\sin \frac{90}{73} \theta \right)^{2,166}$	$73^\circ \leq \theta \leq 97^\circ$ $-1,3 + 0,8 \left(\sin \left(\frac{90}{24} (\theta - 73) \right) \right)^{2,395}$	$97^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ -0.5	0.56
K 1.5	-1.5	$0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ $1 - 2,5 \left(\sin \frac{90}{75} \theta \right)^{2,104}$	$75^\circ \leq \theta \leq 102^\circ$ $-1,5 + 1,0 \left(\sin \left(\frac{90}{27} (\theta - 75) \right) \right)^{2,395}$	$102^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ -0.5	0.49
K 1.6	-1.6	$0^\circ \leq \theta \leq 76^\circ$ $1 - 2,6 \left(\sin \frac{90}{76} \theta \right)^{2,085}$	$76^\circ \leq \theta \leq 104^\circ$ $-1,6 + 1,1 \left(\sin \left(\frac{90}{28} (\theta - 76) \right) \right)^{2,395}$	$104^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ -0.5	0.46

4. táblázat: A $c_{pe}(\theta)$ terület menti megoszlás képletei a VGB szerint (VGB-Guideline)

3.5.2.4. Belső szélszívás (w_i)

A belső szélteherhez tartozó nyomási tényező (c_{pi}) megoszlása a VGB-Guideline szerint a következő:

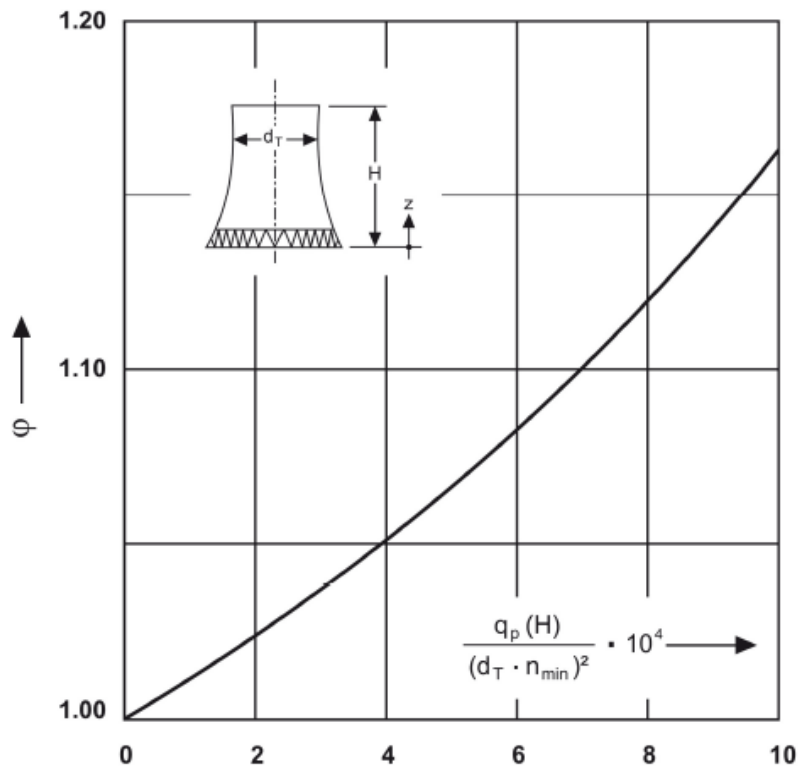
A belső szélszívást a hűtőtorony teljes magasságán és területén állandónak kell tekinteni. Ez egy szívóhatás, ezért az előjele negatív. Ebből a belső szélszívás együtthatója:

$$c_{pi} = -0,50$$

A w_i belső szélteher mindenhol állandó, a külső teher maximális értékének fele.

3.5.2.5. A szél dinamikus hatása szélirányban

A szél szélirányba eső dinamikus hatását a dinamikus tényező alkalmazásával vesszük figyelembe, mely az elsődleges szerkezet legalacsonyabb sajátfrekvenciájától (n_{min}), a maximális torlónyomástól ($q_p(H)$) és a torony geometriájától függ. A dinamikus tényező meghatározásához a VGB-Guideline az alábbi görbe alkalmazását javasolja vasbetonból készült hiperbolikus hűtőtoronyok esetén (15. ábra).



15. ábra: A szél dinamikus hatásának függvénye (VGB-Guideline)

Alkalmazandó mértékegységek:

$$q_b - \text{kN/m}^2$$

$$n_{\min} - 1/\text{s}$$

$$d_T, H_S, H_T, z - \text{m}$$

A vízszintes tengelyen ábrázolt zárt képletben szereplő értékek a közelítő hiperbola adataival kitöltve az alábbiak:

$$\frac{q_b(H)}{(d_T \cdot n_{\min})^2} \cdot 10^4$$

ahol: $H = 120 \text{ m}$

- a torony teljes magassága

$$d_T = 54 \text{ m}$$

- a torokkör átmérője

$$q_b(H) = q_p(120) = 1,226 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- a torlónyomás csúcsértéke

$$n_{\min} = 0,788 \frac{1}{\text{s}}$$

- a legkisebb sajátfrekvencia

Mindezeket a fenti kifejezésbe behelyettesítve:

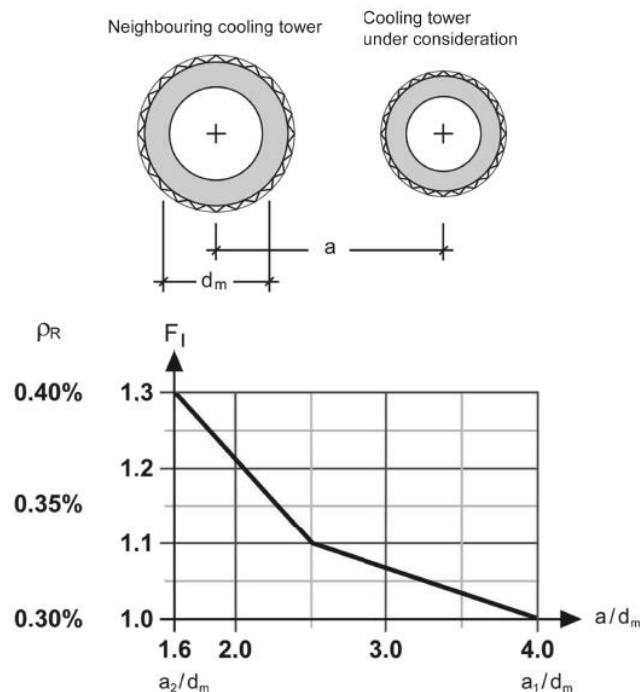
$$\frac{q_b(H)}{(d_T \cdot n_{\min})^2} \cdot 10^4 = 6,91$$

A görbe alapján a dinamikus tényező értéke leolvasható:

$$\varphi = 1,10$$

3.5.2.6. Interferencia hatása

Az interferencia hatása egy fontos kérdés a hűtőtornyok tekintetében. Ha további hűtőtornyok vagy nagy teljesítményű erőművi berendezések vannak a hűtőtorny közvetlen közelében, akkor azok áramlási mezői zavarják egymást és megváltoztatják a statikus és dinamikus szélterhelést a szabadon álló toronyhoz képest. Következésképpen a feszültségekben felerősödések léphetnek fel a szomszédos építmények típusától és távolságától függően. Az interferencia hatását úgy vesszük figyelembe, hogy a statikus szélterhelést megnöveljük egy ún. F_I interferenciatényezővel. A VBG-Guideline egy görbét javasol (ld. 16. ábra), amely a vasbetonból készült hiperbolikus hűtőtornyokhoz tartozik.

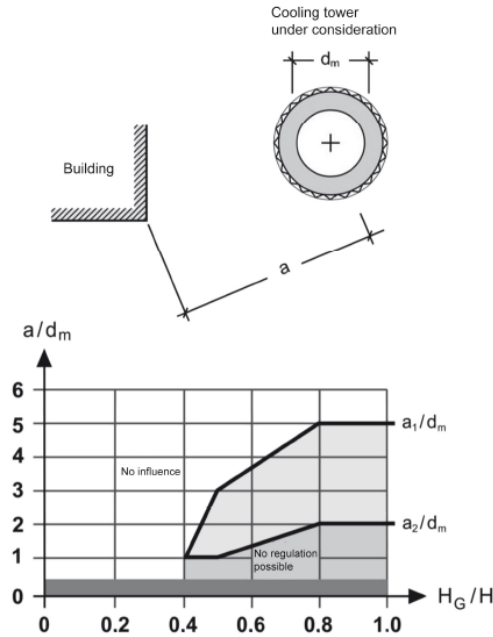


16. ábra: Hűtőtorny-hűtőtorny interferenciája (VGB-Guideline)

A megnövelt szélterhelésen kívül az interferencia hatását még a héj alsó felében elhelyezett gyűrűirányú vasalási hányad minimumjának növelésével veszik figyelembe.

A héj felső felének minimális vasmennyiségét nem kell megnövelni, mivel az eleget tesz az előírásoknak. A megnövelt szélterhelést figyelembe kell venni a torony és a tartószerkezet terhelésekor, beleértve az alapozást is, viszont az altalaj vizsgálatához nem.

Az interferenciatényezőt az $\frac{a}{d_m}$ távolság paraméter és a szomszédos épületek típusának figyelembevételével határozzák meg. A hűtőtorny-hűtőtorny interferencia távolságparamétere ld. 16. ábra, illetve a hűtőtorny-épület interferencia távolságparamétere ld. 17. ábra.



17. ábra: Hűtőtorony-épület interferenciája (VGB-Guideline)

A héj átlagos d_m átmérőjét a következőképpen számítható:

$$d_m = \frac{d_u + d_T}{2} = 64,64 \text{ m}$$

ahol: $d_u = 75,28 \text{ m}$ - az alsó perem átmérője

$d_T = 54 \text{ m}$ - a torokkör átmérője

Ha az $\frac{a}{d_m}$ távolságmaraméter nagyobb, mint az $\frac{a_1}{d_m}$ felső határérték, akkor $F_I = 1,0$. Ha $\frac{a}{d_m}$ kisebb, mint az $\frac{a_2}{d_m}$ alsó határérték, akkor nem kell interferenciatényezőt megadni, mivel ebben az esetben a szélterhelés globális növelése nem alkalmazható megfelelően. Ebben az esetben részletesebb vizsgálatokra van szükség (pl. szélcsatorna-vizsgálatok). Ha $\frac{a_1}{d_m} > \frac{a}{d_m} > \frac{a_2}{d_m}$, akkor az F_I interferenciatényezőt és a sugárirányban elhelyezett szükséges megnövelt minimális vashányadot a fentebbiek szerint kell meghatározni. A 16. ábra a hűtőtorony-hűtőtorony interferenciára vonatkozik. A határérték $\frac{a_1}{d_m} = 4,0$ és $\frac{a_2}{d_m} = 1,6$. Az interferenciatényező kettőnél több hűtőtoronyból álló csoportokra is érvényes. A 17. ábra a hűtőtorony-épület interferenciájára vonatkozik. Az interferenciatényező elhanyagolható, ha az épület magassága a hűtőtorony magasságának 40%-ánál kisebb. Az F_I interferenciatényezőt és a héj alsó felében elhelyezett gyűrűirányú vasalási hányad minimumát (ρ_R), az $\frac{a_1}{d_m}$ és az $\frac{a_2}{d_m}$ értékek meghatározása után a 11. ábrával összhangban a következő egyenletekkel lehet kiszámítani:

$$F_I = 1 + 0,1 \cdot \left(\frac{a_1}{d_m} - \frac{a}{d_m} \right) \geq 1,0$$

$$\rho_R = 0,1 \cdot \left(3 + \frac{\left(\frac{a_1}{d_m} - \frac{a}{d_m} \right)}{3} \right) \% \geq 0,3\%$$

Ha a hűtőtornyot több magas épületcsoport veszi körül, akkor az interferenciahatások részletesebb vizsgálata indokolt. Ha egynél több interferenciahelyzet áll fenn, a legkritikusabb esetet kell mértékadónak tekinteni. Az interferenciatényezőket figyelmen kívül lehet hagyni, ha az interferencia statikus és dinamikus hatásait részletesebben vizsgálták.

Jelen esetben egy teljesen új tornyot tervezünk, melyhez közel nincsen másik torony, illetve épület sem. Ezért nem áll fenn hűtőtorny-hűtőtorny interferenciájának, illetve hűtőtorny-épület interferenciájának esete sem. Tehát az interferenciatényező értéke:

$$F_I = 1,0$$

3.5.3. Hóteher

Vasbeton hűtőtornyok esetében a hóteher csak az alsó kiszélesedő részre és a felső merevítő gyűrűre van hatással, mivel a torony héjának dőlésszöge a függőlegeshez képest mindenhol 70°-nál nagyobb.

Egy kis kutatás után megállapítható, hogy Szíria ezen térségében a fagy teljesen ismeretlen és a hó legfeljebb az Alavita-hegység csúcsain jelenik meg [7]. Ezen térségben a megfigyelt maximális hótakaró 10 cm volt.

3.5.4. Hasznos teher

Esetleges teher a hűtőtorny szerkezetén nem működik, kivételt képez ez alól a járdák és lépcsők/lépcsőházak szerkezete [7].

3.5.5. Szerelési terhek

A szerelési terheket az alkalmazott építési eljárásnak megfelelően karakterisztikus hatásértékként kell figyelembe venni. Az ideiglenes szerelési terheket általában a csúszózszaluzat és az állványzat rögzítő elemei, valamint a daru stabilizáló kábelei okozzák. Ezeket a terheket jelen TMDK dolgozat keretében elhanyagolom [7].

3.5.6. Földrengés teher

A talajgyorsulás referenciaértékét Tishreen (Szíria) területén az UBC 1997 határozza meg. Az UBC 1997 szerinti 3. zónába tartozik, melynek talajgyorsulási referenciaértéke $a_{gR} = 0,30 \cdot g$. A továbbiakban a tervezési válaszspektrumot azonban az EC8 szerint határozzuk meg.

A talajgyorsulás tervezési értéke (a_g) a következő képlettel számítható:

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR} = 4,12 \frac{m}{s^2}$$

ahol: $\gamma_I = 1,40$ - fontossági tényező (4. kategória – erőmű)

$a_{gR} = 2,94 \frac{m}{s^2}$ - a talajgyorsulás referenciaértéke

A szeizmikus hatás vízszintes komponenseire a tervezési válaszspektrumot ($S_d(T)$) a következő kifejezésekkel kell meghatározni:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C}{T} \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D < T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

ahol: $a_g = 4,12 \frac{m}{s^2}$ - a talajgyorsulás tervezési értéke

3.5.7. Teherbírási határállapot

Tervezési koncepció: A teherbírás határállapotának (ULS) biztosítása azt mutatja, hogy a keletkező feszültségek tervezési értékei nem haladják meg a számított ellenállások tervezési értékei [7].

Design situation	Concrete γ_c	Reinforcement γ_s	System resistance in non-linear calculation $\gamma_R^{b)}$
Permanent and variable design situations	1.50	1.15	1.30
Accidental design situation/ earthquake ^{a)}	1.30	1.00	1.10

5. táblázat: Az ellenállásokra vonatkozó parciális biztonsági tényezők értékei (VGB-Guideline)

Az állandó tervezési helyzethez tartozó teherkombináció:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

A rendkívüli tervezési helyzethez tartozó teherkombináció:

$$\sum_{j \geq 1} 1,0 \cdot G_{k,j} + A + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Földrengési helyzethez tartozó teherkombináció:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_E + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

3.5.8. Használhatósági határállapot

A használhatósági határállapot (SLS) biztosítását a repedéstágasság-korlátozásával kell igazolni. A feszültségek és a deformációk korlátozása nem releváns a normál hűtőtornyok esetében, ezért a következőkben nem foglalkozunk velük [7].

A repedéstágasság-korlátozásának biztosításához a hatások kombinációit és a megengedett repedéstágasságokat (w_k) értékeket kell meghatározni. A hűtőtorny szerkezetére vonatkozóan különbséget kell tennünk a következők között:

A héjra vonatkozóan: $w_k = 0,20 \text{ mm}$

Az X-lábra és alapozásra vonatkozóan: $w_k = 0,30 \text{ mm}$

A gyakori teherkombináció:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

3.5.9. Stabilitásvizsgálat

A hűtőtorny stabilitásának biztosításához meg kell határoznunk a kritikus teherparamétert, mely a közvetkező teherkombinációból határozható meg:

$$G + w_e + w_i$$

A VGB szerint, ha a kritikus teherparaméter (γ_B) nagyobb, mint 5, akkor a stabilitásvesztés nem következik be.

3.6. Ellenállások, anyagjellemzők

Az „ellenállás” oldalhoz tartozó biztonsági tényezők:

- acélszerkezetek esetében az EC3 szerint:

$$R_d = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{f_y}{1,1}$$

- vasbeton szerkezetek esetében az EC2 szerint:

betonra vonatkozóan: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,5}$

betonacélra vonatkozóan: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{f_{yk}}{1,15}$

A vasbeton toronyra vonatkozó anyagminőségek:

Alapgyűrű: C30/37

X-lábak: C35/45

Héj: C30/37

Felső peremgyűrű: C30/37

Alsó peremgyűrű: C30/37

4. Vasbeton torony

4.1. Alakmeghatározás

A vasbeton torony tervezése alakmeghatározással kezdődik. A megadott gépészeti adatok függvényében, korábbi tapasztalatok alapján, valamint ökölszabályok alapján határozzuk meg a torony hiperbolájának alakját.

<u>Alapadatok:</u>	- a torokkör sugara:	$a = r_0 = 27,00 \text{ m}$
	- a torony teljes magassága:	$h = 120,00 \text{ m}$
	- a torokkör és a torony tetőpontjának távolsága:	$z_1 = 11,50 \text{ m}$
	- a torokkör magassága:	$z_2 = 108,50 \text{ m}$
	- az alapgyűrű középvonalának mélysége:	$h_{alap} = -4,00 \text{ m}$
	- az alapgyűrű középv. és a torokkör távolsága:	$z_3 = 112,50 \text{ m}$
	- az alapgyűrű középvonalának sugara:	$r_3 = 43,50 \text{ m}$
	- $b \cdot b$ tényező értéke:	$b \cdot b = 10,8801$

A szerkesztés előtt el kell döntenünk, hogy a toronynak hány lába legyen. Célszerűen 4-gyel osztható számnak kell lennie (pl. 24, 28, 32 vagy 36), hogy a köröket kedvező központi szögű körcikkelyekre tudjuk felosztani. Valamint meg kell határozunk a z_1 távolságot, mely a torony teteje és a torokkör közötti távolság. Ezeken a felvett adatokon tudunk a későbbiek folyamán változtatni, hogy az iterációs folyamat során a lehető legkedvezőbb toronyalakot kapuk.

Ebben az esetben a z_1 távolságot 11,5 m-re veszem fel, illetve 36 db lábbal számolok a továbbiakban és arra végzem el a szerkesztést is.

Az alakmeghatározás elkészültével ellenőriznünk kell az X-lábak felső szárainak távolságát, melyet a héj alsó síkjának körívén kell mérnünk. Ha ez a két távolság közel megegyezik, akkor a szerkesztés elfogadható. Ha ez a két távolság nagyban különbözik, akkor a korábbiakban felvett z_1 távolságot, illetve a lábak számát változtatva iterációt végezhetünk, míg ez a két távolság közel megegyező nem lesz.

4.2. VEM-modell

Az alakmeghatározás során a torony részeinek főbb méreteit meghatároztuk, melyek pontosabb vizsgálatához végeselemes számító és méretező szoftvert kell használnunk. Jelen TMDK dolgozatban feldolgozott vasbeton szerkezetű hűtőtorony végeselemes modellje AxisVM X7-tel készült.

Ahhoz, hogy a modellt pontosan fel tudjuk építeni meg kell határoznunk az adott magasságokhoz tartozó sugarakat. A hiperbola a torony fontosabb pontjain megy keresztül, ilyen például az alapgyűrű középsíkja, a héj alsó síkja, a torokkör, a felső peremgyűrű, illetve a torony teteje. Ezek azok a magasságok, melyekhez tartozó sugarat feltétlenül meg kell határoznunk. Azonban, hogy a torony alakját megfelelően közelítsük közbelső magasságokban is meghatározzuk a sugarat, melyhez 5,0 m-es végeselemes osztást alkalmazunk. A kritikus helyek közelében (héj alsó síkja, torokkör, torony teteje) ezt a felosztást besűrítjük.

Ezek alapján az adott magasságokhoz tartozó sugárhosszak meghatározhatóak.

A 6. táblázat összefoglalja a hiperbola egyenletével kiszámított sugarakat a magasság mentén.

A hiperbola egyenlete:
$$r(z) = \sqrt{a^2 + \frac{z^2}{b^2}}$$

ahol:	$r(z)$	- sugár a magasság mentén
	a	- a torokkör sugara
	z	- pontok távolsága a torokkör magasságától
	b	- paraméter

A VEM-modell építése során fontos a héj vastagságának változása. A héj alsó síkjánál fontos megjegyezni, hogy legalább olyan vastagnak kell lennie, mint az X-láb sugárirányú keresztmetszeti oldala. Ettől felfelé folyamatosan csökken a héj vastagsága, majd a torony teteje közelében újra megvastagszik, bár itt már kisebb mértékben (ld. 6. táblázat).

#	Szint (H [m])	r_i [m]	vtg [cm]
-	-4,0	43,500	-
-	-3,0	43,263	-
-	0,0	42,556	-
-	5,0	41,395	-
-	10,0	40,258	-
-	15,0	39,147	-
-	20,0	38,064	-
1	22,0	37,639	140
2	22,5	37,534	130
3	23,0	37,429	115
4	23,7	37,282	95
5	24,5	37,115	75
6	25,5	36,908	50
7	27,0	36,599	25
8	30,0	35,991	20
9	35,0	35,008	20
10	40,0	34,063	20
11	45,0	33,160	19
12	50,0	32,304	19
13	55,0	31,497	19
14	60,0	30,744	19
15	65,0	30,049	19
16	70,0	29,415	19
17	75,0	28,847	19

18	80,0	28,349	19
19	85,0	27,924	19
20	90,0	27,576	18
21	95,0	27,308	18
22	100,0	27,123	18
23	105,0	27,021	18
24	108,5	27,000	18
25	110,0	27,004	18
26	111,5	27,015	18
27	113,0	27,034	18
28	114,0	27,051	18
29	115,0	27,072	18
30	116,0	27,096	25
31	116,8	27,117	32
31	117,6	27,141	36
33	118,8	27,180	40
34	120,0	27,224	40

6. táblázat: A hiperbola alakjának összefoglalása

A héj alsó síkjánál, illetve a torony tetejénél kialakult $\text{ctg}(\varphi)$ szöget a következő tapasztalati összefüggésekkel tudjuk ellenőrizni, hogy a tűréshatáron belül vannak-e.

A héj alsó síkjának ellenőrzése:

$$0,211 < 0,3 \rightarrow \text{Megfelel!}$$

$$90 - \arctan\left(\frac{1}{0,211}\right) * \frac{180}{\pi} < \arctan\left(\frac{1}{0,30}\right) * \frac{180}{\pi} = 11,927^\circ < 16,699^\circ \rightarrow \text{Megfelel!}$$

4.3. Felső-, és alsó peremgyűrűk közelítő méretezése

A héj felső és alsó peremét a megfelelő peremgyűrűkkel kell merevíteni. Amennyiben nem végeztek részletes vizsgálatot, a peremgyűrűk merevségét legalább a következő arány alkalmazásával kell megtervezni:

$$\frac{I_x}{r_H} \geq 0,003 \text{ m}^3$$

Ahol:

- I_x - a keresztmetszet inercianyomaték 1. fesz. állapotban
- r_H - a peremgyűrű középvonalának sugara

Alsó peremgyűrű ellenőrzése:

Az alsó peremgyűrű magasságát figyelembe vettük a végelemek felosztásakor, melynek 0,5 m magasságot feltételeztünk. A peremgyűrű vastagságának 1,40 m-t veszünk fel.

- az alsó peremgyűrű szélessége: $h = 1,40 \text{ m}$
- az alsó peremgyűrű magassága: $b = 0,50 \text{ m}$
- a keresztmetszet inercianyomatéka: $I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} = 0,1143 \text{ m}^3$
- a héj sugara az alsó peremgyűrű magasságában: $r_{héj} = 37,639 \text{ m}$

A peremgyűrű sugara ebben az esetben megegyezik a héj sugarával.

$$\frac{I_x}{r_{héj}} = 0,00304 \geq 0,003 \rightarrow \text{Megfelel!}$$

Felső peremgyűrű ellenőrzése:

A felső peremgyűrű vastagságának 0,40 m-t, magasságának pedig 1,40m-t feltételezünk.

- a peremgyűrű szélessége: $h = 1,40 \text{ m}$
- a peremgyűrű magassága: $b = 0,40 \text{ m}$
- a keresztmetszet inercianyomatéka: $I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} = 0,0915 \text{ m}^3$
- a héj sugara az alsó peremgyűrű magasságában: $r_{héj} = 27,18 \text{ m}$

A peremgyűrű sugara ebben az esetben a héj sugarához képest, a gyűrű szélességének felével megnő.

- a peremgyűrű középvonalának sugara: $r_{gyűrű} = r_{héj} + \frac{h}{2} = 27,88 \text{ m}$

$$\frac{l_x}{r_{gyűrű}} = 0,00328 \geq 0,003 \rightarrow \text{Megfelel!}$$

4.4. Az X-lábak közelítő méretezése

Az X-lábak közelítő méretezését a karcsúságuk ellenőrzésével tehetjük meg. A karcsúságot két fő irányban, sugár és érintőirányban vizsgáljuk (érintőirány az X-lábak síkját jelenti).

A karcsúság ellenőrzése:

$$\frac{k \cdot L}{r}$$

ahol:

L	- a lábak effektív (nem megtámasztott) hossza
k	- az effektív hossztenyező
r	- a keresztmetszet sugara (téglalap alakú szelvények esetében $0,3h$ vagy $0,3b$)

Az effektív hossztenyező a VGB-Guideline szerint a következő:

- sugárirányban $k = 0,9$ (alul befogott, felül csuklós)
- érintőleges irányban $k = 0,7$ (alul befogott, felül rugalmas)

Az X-lábak effektív hossza a két irányban eltér:

$$L_y = 22,521 \text{ m}$$

$$L_z = 14,782 \text{ m}$$

Karcsúság vizsgálata a két irányban:

- sugárirányban: $\frac{k \cdot L_y}{0,3 \cdot h} = \frac{0,9 \cdot 22,521}{0,3 \cdot 1,2} = 56,3 \geq 40$
- érintőleges irányban: $\frac{k \cdot L_z}{0,3 \cdot b} = \frac{0,7 \cdot 14,782}{0,3 \cdot 0,9} = 38,3 \cong 40$

Sugárirányban a kapott érték meghaladja a háterértéket (40), tehát a keresztmetszet ebben az irányban karcsú. Érintőleges irányban elég közel vagyunk a karcsúsági határértékhez, hogy ebben az irányban is karcsúnak tekintsük a keresztmetszetet.

4.5. Teherfelvétel

A VEM-modellel működtetett terheket a további alpontokban részletesen, számszerűsítve összesítem.

4.5.1. Szélteher meghatározása

A 3.5.2 alpontban ismertetett szélteher hatását a szerkezet bonyolultságából kifolyólag szükséges részletesebben vizsgálni. A hiperbolikus héjszerkezeten a szélteher értéke a magasság mentén változik, illetve függ a szél irányától is. Mivel a VEM-modell sík héjelemekből épül fel, ezért a sík héjelemeken megoszló terheket működtetve vesszük figyelembe a szél hatását.

A szél magasságmenti változásának meghatározása:

Egy adott sík héjelemre meghatározott megoszló szélteher intenzitását a sík héjelem magasságának középpontjában számítjuk ki (ld. a végelemek osztását a 6. táblázat tartalmazza).

Szélteher értékének meghatározása EC1 szerint													
	10 perces átlagos szélsebesség										A szél dinamikus tényezője [-]	Interferencia tényező [-]	W [kN/m ²]
H [m]	v _b ^{10min} [m/sec]	q _b [kN/m ²]	z ₀ [m]	k _z [-]	c _s (z) [-]	c ₀ [-]	k _f [-]	l _f (z) [-]	c _s (z) [-]	q _p (z) [kN/m ²]			
0,00	21,04	0,277	0,010	0,170	-	1,00	1,00	-	-	0,766	1,10	1,00	0,843
10,00					1,173			0,145	2,769	0,766			0,842
20,00					1,290			0,132	3,198	0,884			0,973
22,00					1,306			0,130	3,259	0,901			0,992
22,25					1,308			0,130	3,267	0,903			0,994
22,75					1,312			0,129	3,281	0,907			0,998
23,35					1,317			0,129	3,298	0,912			1,003
24,10					1,322			0,128	3,318	0,918			1,009
25,00					1,328			0,128	3,342	0,924			1,017
26,25					1,336			0,127	3,374	0,933			1,026
28,50					1,350			0,126	3,428	0,948			1,043
32,50					1,373			0,124	3,516	0,972			1,069
37,50					1,397			0,122	3,612	0,999			1,099
42,50					1,418			0,120	3,697	1,022			1,125
47,50					1,437			0,118	3,773	1,043			1,148
52,50					1,454			0,117	3,842	1,063			1,169
57,50					1,470			0,116	3,906	1,080			1,188
62,50					1,484			0,114	3,965	1,096			1,206
67,50					1,497			0,113	4,019	1,111			1,223
72,50					1,509			0,113	4,070	1,126			1,238
77,50					1,520			0,112	4,118	1,139			1,253
82,50					1,531			0,111	4,163	1,151			1,266
87,50					1,541			0,110	4,205	1,163			1,279
92,50					1,550			0,110	4,246	1,174			1,292
97,50					1,559			0,109	4,284	1,185			1,303
102,50					1,568			0,108	4,321	1,195			1,314
106,75					1,575			0,108	4,350	1,203			1,323
109,25					1,579			0,108	4,368	1,208			1,329
110,75					1,581			0,107	4,378	1,211			1,332
112,25					1,583			0,107	4,388	1,213			1,335
113,50	1,585	0,107	4,396	1,216	1,337								
114,50	1,586	0,107	4,402	1,217	1,339								
115,50	1,588	0,107	4,409	1,219	1,341								
116,40	1,589	0,107	4,414	1,221	1,343								
117,20	1,590	0,107	4,419	1,222	1,344								
118,20	1,592	0,107	4,426	1,224	1,346								
119,40	1,594	0,107	4,433	1,226	1,349								

7. táblázat: A szélteher magasságmenti változása

A torlónyomás csúcserőértékét ($q_p(z)$) a 3.5.2.1 alponthban ismertetett összefüggések alapján határozhatjuk meg. A szél dinamikus tényezőjének értékét a 3.5.2.5 alponthban, illetve az interferencia tényező értékét a 3.5.2.6 alponthban meghatároztuk. Ebből meghatározható a szélteher értéke az egyes magasságokban.

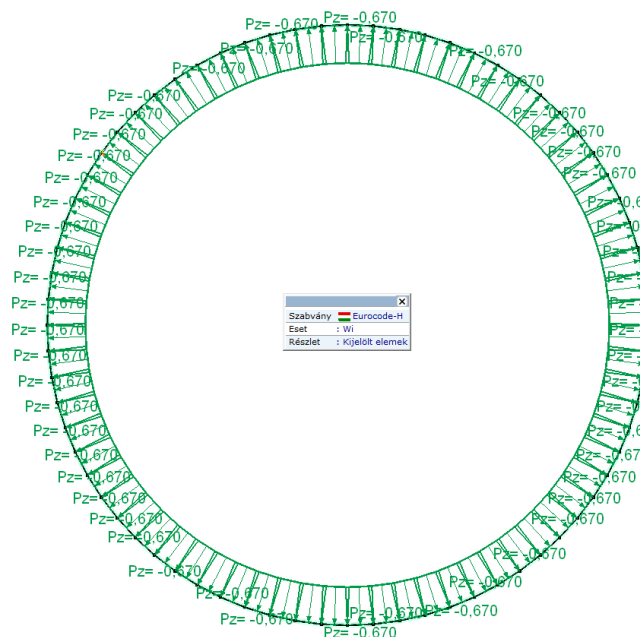
4.5.1.1. A belső szélszívás értékének meghatározása

A 3.5.2.4 alponthban megállapítottuk, hogy a belső szélteherhez tartozó nyomási tényező (c_{pi}) értéke -0,50. A belső szélszívás értéke független a széliránytól és a toronytetőn fellépő legnagyobb szélnyomás értékét kell figyelembe venni. Tehát:

$$w_i = c_{pi} \cdot q_p(H) \cdot \varphi \cdot F_l$$

Számszerűsítve:

$$w_i = c_{pi} \cdot q_p(H) \cdot \varphi \cdot F_l = -0,5 \cdot 1,226 \cdot 1,10 \cdot 1,00 = -0,670 \frac{kN}{m^2}$$



20. ábra: A VEM-modellre alkalmazott belső szélszívás kerületmenti megoszlása (AxisVM X7)

A 20. ábra mutatja a torony legfelső „végelem gyűrűjére” ható belső szélszívást. A belső szélszívás minden magasságban megegyezik, így a további elemekre is hasonlóképpen kell elhelyezni.

4.5.1.2. A külső szélnyomás értékeinek meghatározása

A külső szélnyomás értéke függ a magasságtól, illetve a szél irányától. A magasságmenti eloszlást az előbbieken meghatároztuk. A 3.5.2.3 pontban megállapítottuk, hogy a szélteher kerületmenti megoszlásához a K1.0 görbét alkalmazhatjuk.

A külső szélteher kerületmenti megoszlásának meghatározása (ld. 14. ábra és 4. táblázat:

A $c_{pe}(\theta)$ kerület menti megoszlás képletei a VGB szerint (VGB-Guideline)4. táblázat):

$$c_{pe}(\theta) = \begin{cases} 1 - 2,0 \left(\sin \frac{90}{70} \theta \right)^{2,267}, & \text{ha } 0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ \\ -1,0 + 0,5 \cdot \left(\sin \left(\frac{90}{21} (\theta - 70) \right) \right)^{2,395}, & \text{ha } 70^\circ \leq \theta \leq 91^\circ \\ -0,5, & \text{ha } 91^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases}$$

Csak úgy, mint a magasságmenti megoszlást, a kerületmenti megoszlást is a sík héjelemek középpontjában vizsgáljuk (8. táblázat):

K1.0 görbe			
Vízszintes eloszlás (külső szélteher)			
Héj elem	Szög		C_{pe}
#	[°]	[rad]	[-]
-	0	0,0000	1,0000
1	2,5	0,0436	0,9971
2	7,5	0,1309	0,9652
3	12,5	0,2182	0,8912
4	17,5	0,3054	0,7734
5	22,5	0,3927	0,6145
6	27,5	0,4800	0,4213
7	32,5	0,5672	0,2032
8	37,5	0,6545	-0,0282
9	42,5	0,7418	-0,2598
10	47,5	0,8290	-0,4785
11	52,5	0,9163	-0,6714
12	57,5	1,0036	-0,8272
13	62,5	1,0908	-0,9365
14	67,5	1,1781	-0,9929
15	72,5	1,2654	-0,9911
16	77,5	1,3526	-0,8897
17	82,5	1,4399	-0,7029
18	87,5	1,5272	-0,5398
19	92,5	1,6144	-0,5000

8. táblázat: A külső szélteher kerület menti megoszlása

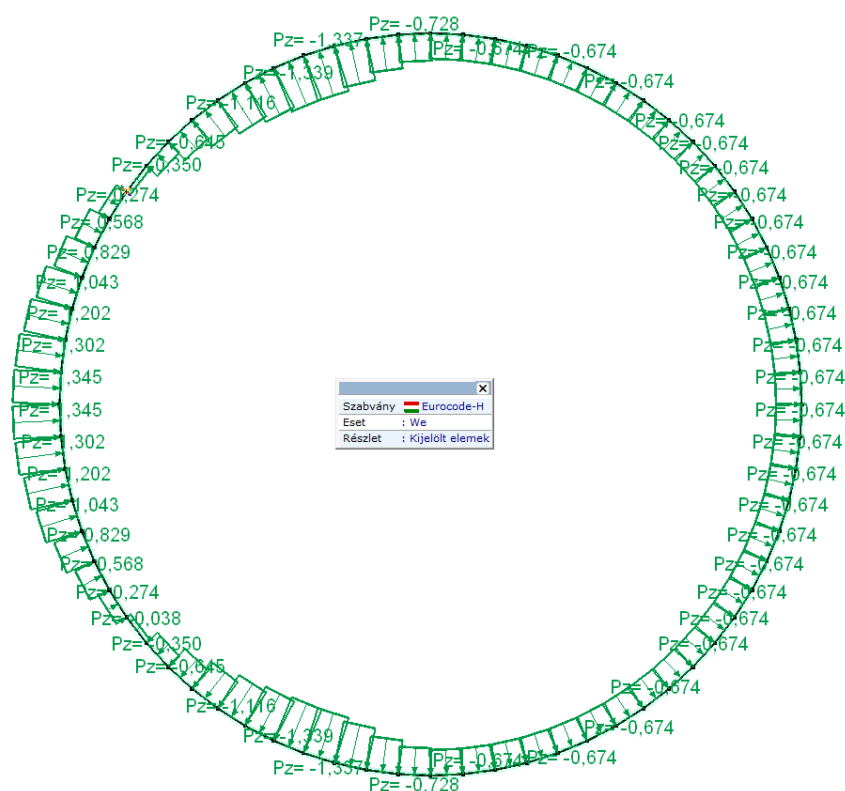
Ezek alapján a külső szélnyomás értéke meghatározható:

$$w_e(z, \theta) = c_{pe}(\theta) \cdot q_p(z) \cdot \varphi \cdot F_l$$

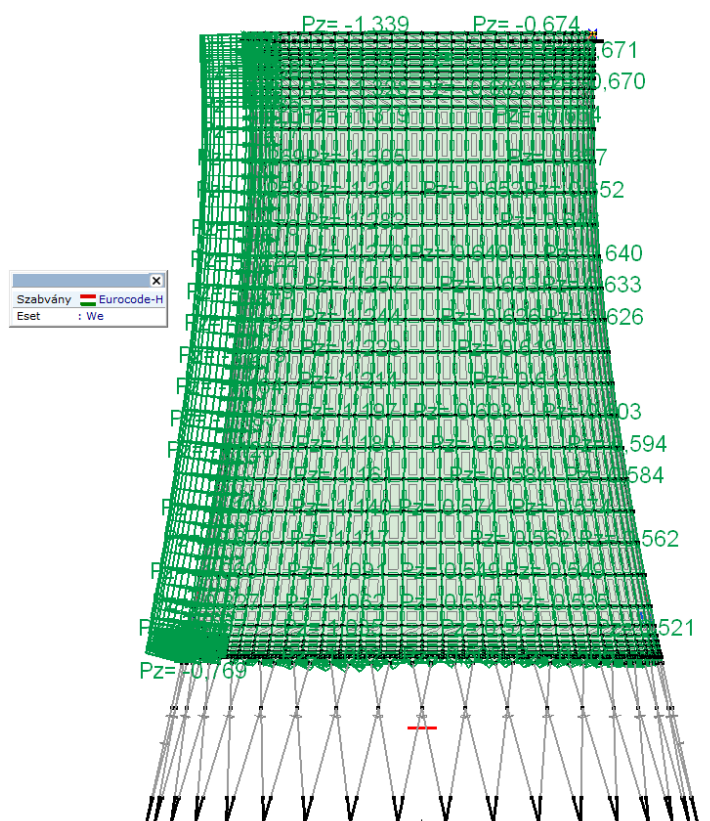
Számszerűsítve: $w_e(119,4,2,5) = 0,9971 \cdot 1,226 \cdot 1,10 \cdot 1,00 = 1,345 \frac{kN}{m^2}$

H=119,4 m	
Szög [°]	W_e [kN/m ²]
2,5	1,345
7,5	1,302
12,5	1,202
17,5	1,043
22,5	0,829
27,5	0,568
32,5	0,274
37,5	-0,038
42,5	-0,350
47,5	-0,645
52,5	-0,905
57,5	-1,116
62,5	-1,263
67,5	-1,339
72,5	-1,337
77,5	-1,200
82,5	-0,948
87,5	-0,728
92,5	-0,674

9. táblázat: A külső szélnyomás kerületmenti eloszlása a 119,40 m magasságban



21. ábra: A VEM-modellre alkalmazott külső szélnyomás kerületmenti megoszlása (AxisVM X7)



22. ábra: A VEM-modellre alkalmazott külső szélnyomás magasságmenti megoszlása (AxisVM X7)

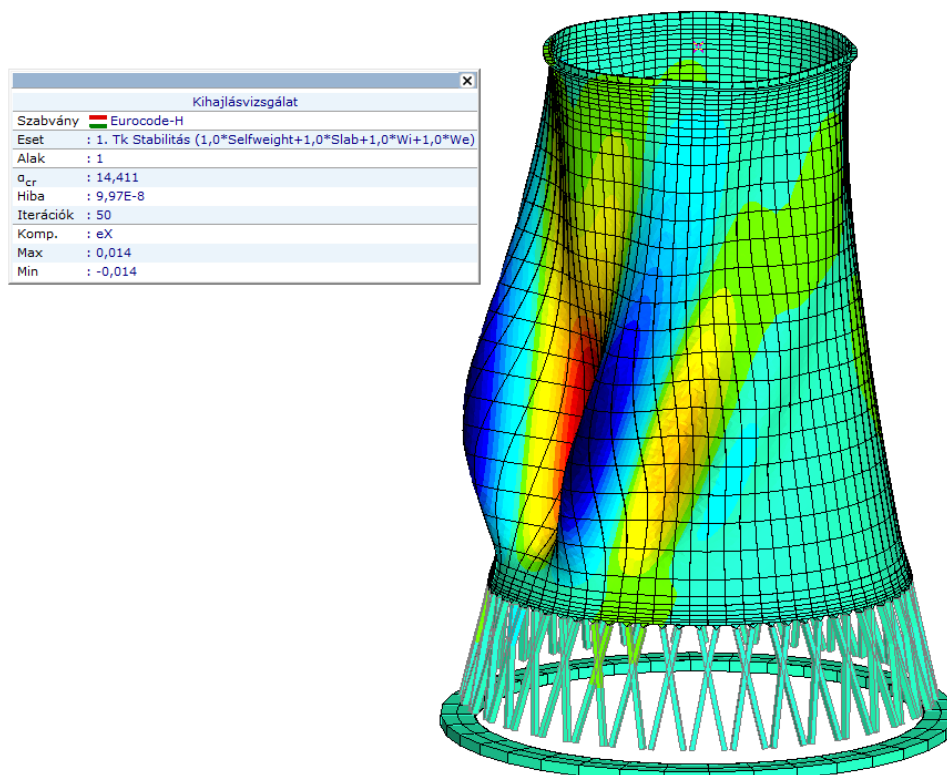
4.5.2. Önsúly meghatározása

A szerkezeti elemek önsúlyát a végeleemes program (AxisVM X7) automatikusan határozza meg. A vasbeton fajsúlya továbbra is $25,0 \text{ kN/m}^3$.

4.6. Stabilitásvizsgálat

A lineárisan rugalmas anyagokból készült szerkezetek esetében a geometriai mátrix a normál erők lineáris függvénye. Amennyiben a normálerők által a hajlítómerevség nullára csökken (az eredő merevségi mátrix szinguláris), a szerkezet elveszíti teherbíró képességét. Ez tulajdonképpen egy sajátérték feladat, melyet az AxisVM X7 automatikusan elvégez. A legkisebb sajátérték a kritikus teherparamétert adja. A stabilitásvizsgálathoz szükséges teherkombinációt, illetve a kritikus teherparaméter határértékét a 3.5.9 alpont tartalmazza.

A stabilitásvizsgálat, illetve a kritikus teherparaméter meghatározásához kihajlás vizsgálatot futtatunk a VEM-modellen, melynek az első kihajlási alakhoz tartozó kritikus teherparamétere lesz a mértékadó.

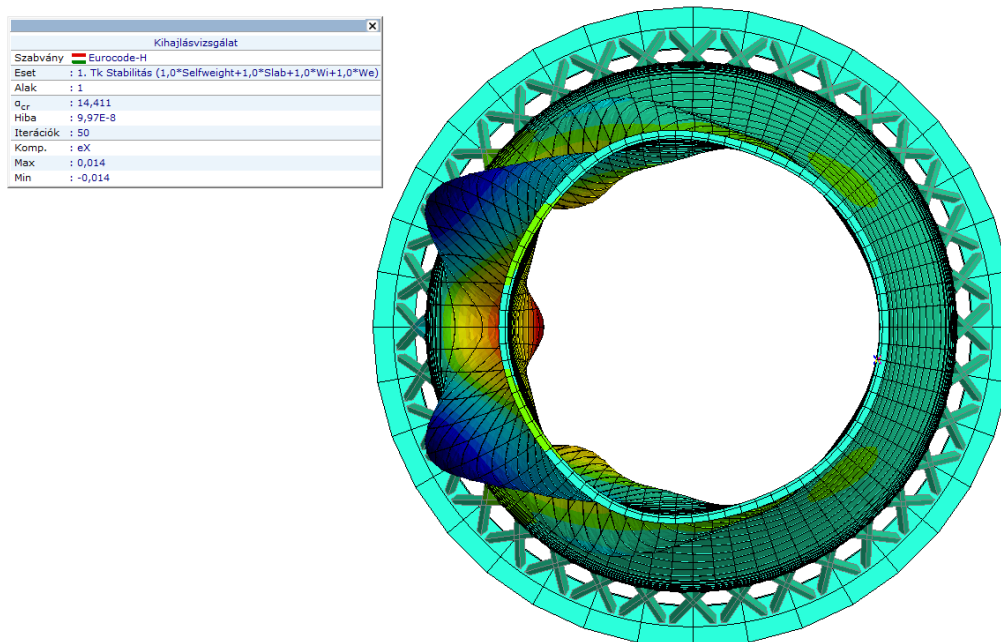


23. ábra: A kritikus teherparaméter meghatározása AxisVM X7-tel

Mivel a program által meghatározott kritikus teherparaméter értéke nagyobb, mint 5, ezért a stabilitásvesztés nem következik be.

$$\alpha_{cr} = 14,411 > 5 \rightarrow \text{Megfelel!}$$

A stabilitásvizsgálatból megállapítható, hogy a héj a meghatározott vastagságával és anyagminőségével minden helyen megfelelő!



24. ábra: A kihajlászvizsgálat eredménye felülnézetben (AxisVM X7)

5. Összefoglalás

A TMDK dolgozat megfelelően összefoglalja a hűtőtornyok működési elvét, fajtáit és azok szerkezeti kialakításait. A hűtőtornyok működési elvét megismerve meghatározhatjuk a hűtőtorony anyagát, mely egy döntő szempont a torony statikai viselkedését tekintve. Ha nedves elven működő toronyról beszélünk, akkor célszerű vasbetonból készíteni a szerkezetet, hogy elkerüljük az acél korróziójának kérdéskörét, ha száraz toronyról beszélünk, akkor pedig célszerű acélból készíteni a kedvező önsúlyból kifolyólag. A torony működési elvét befolyásolják a környezeti adottságok, költségvetési szempontok.

A tartószerkezeti tervezés során meg kellett határozni a torony X-lábainak számát, mely célszerűen 4-gyel osztható. Ezután az alapvető geometriai adatok segítségével megszerkesztettem a hiperbola alakját, mely segítségével meghatározható az X-lábak valós mérete, illetve az adott magasságokhoz tartozó héjelem sugara.

A továbbiakban a VEM-modell előkészítéséhez szükséges további geometriai adatokat, illetve a VEM-modellen működtetett terheket határoztam meg, melyek közül a szélteher meghatározása a legnagyobb odafigyelést igénylő lépés. A modell előállítás előtt a közelítő méretezéssel ellenőrizhető elemeit a szerkezetnek ellenőriztem, majd a VEM-modellt megépítettem.

A VEM-modell elkészültével a hűtőtorony stabilitását vizsgáltam, mely az első kihajlási alakhoz tartozó kritikus teherparaméter ellenőrzésével vizsgálható.

A hűtőtorony tervezése ezek után kiegészíthető az X-lábak, valamint a héj, illetve az alapgyűrű vasalásának meghatározásával. Továbbá vizsgálható a torony tetőponti eltolódása, földrengésre, vagy akár hőmérsékletváltozásra való viselkedése is.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Vanya Csillának, aki szakértelmével, hasznos magyarázataival és a konzultációk során tanúsított odafigyelésével, elengedhetetlen tanácsaival rendkívül nagy segítséget nyújtott a TMDK dolgozatom elkészüléséhez.

Továbbá hálával tartozom külső konzulensemnek, Dr. Pálfalvi Dórának, aki a TMDK dolgozatom megírásához rendkívül nagy tudásával, gyakorlatiasságával, valamint odafigyelésével járult hozzá. Köszönöm neki a türelmét, segítőkészségét és pozitív hozzáállását, hogy minden kérdésemre próbált választ adni. Hatalmas segítséget nyújtott mindenben, mellyel hozzájárult a TMDK dolgozat megírásához.

Külön köszönöm a CÉH zRt. valamennyi munkatársának, hogy tapasztalatot szerezhettem és hogy rendkívül rugalmasan kezelték ezt az időszakot. Minden téren a lehető legnagyobb támogatást kaptam tőlük, amit ez úton is köszönök.

Tisztaszívvvel köszönöm szüleimnek és páromnak a sok gondoskodást, ami elkísért a tanulmányaim során. Köszönöm, hogy mellettem álltak és mindenben segítettek. Külön köszönöm édesanyámnak, hogy mindig támogatta döntéseimet.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm a barátaimnak, Mátyásnak, Boglárkának, Bendegúznak, Martinnak, Annamáriának és Norbertnek, hogy együtt éltük át az egyetem jó, bár néha nehéz napjait. Köszönöm a végtelen kitartásukat, segítőkészségüket és a barátságukat.

Utoljára, még szeretném megköszönni a Pécsi Tudományegyetem Építőmérnöki Kara valamennyi oktatójának, dolgozójának azt a lelkiismeretes munkáját, amivel a hallgatók képzését és a versenyképes tudás megszerzését támogatják.

6. Irodalomjegyzék

- [1] L. Heller és Forgó László, „Heller-Forgó-féle hűtőberendezés,” [Online]. Available: <https://shorturl.at/efyB7>.
- [2] Z. Bodnár, „Qubit,” [Online]. Available: <https://shorturl.at/beCM4>.
- [3] „PENTASOL,” [Online]. Available: <https://shorturl.at/cgC04>.
- [4] „Inno-anno,” [Online]. Available: <https://shorturl.at/kGMV2>.
- [5] E. Dulácska, „BME,” [Online]. Available: <https://shorturl.at/cwU02>.
- [6] DOKA, [Online]. Available: <https://shorturl.at/opqM4>.
- [7] V. PowerTech, „Structural Design of Cooling Towers,” VGB PowerTech e.V., Essen, 2019.

7. Ábrajegyzék

1. ábra: A hűtőtornyok működési elve (researchgate.com, Peng Zhang, 2020).....	7
2. ábra: A természetes huzatú nedves hűtőtorny elvi működése (sumimagazin.com, Pester Béla, 2021) .	9
3. ábra: A természetes huzatú nedves hűtőtorny metszete (ou.edu, The University of Oklahoma, 2016)	10
4. ábra: A mesterséges huzatú nedves hűtőtorny elvi működése (pentasol.hu, 2022)	11
5. ábra: A hűtőrendszert bemutató ábra Heller egyik külföldi szabadalmi kérelméből (L. Heller, 1959) .	12
6. ábra: Egyenáramú és ellenáramú torony (mvmegi.mvm.hu, 2021)	14
7. ábra: A szél örvénylése (linkedin.com, Arvind JS, 2023).....	27
8. ábra: A Kármán-féle örvények leválása (Kollár Lajos, 2004)	27
9. ábra: Az örvényleválás hatása (Kollár Lajos, 2004)	28
10. ábra: Hengerháj longitudinális rezgése (Kollár Lajos, 2004).....	28
11. ábra: Hengerháj csavarási rezgése (Kollár Lajos, 2004).....	28
12. ábra: Hengerháj transzverzális rezgése (Kollár Lajos, 2004).....	28
13. ábra: A külső nyomásra vonatkozó nyomásminimumok a felületi érdesség függvényében (VGB-Guideline)	34
14. ábra: A $c_{pe}(\theta)$ kerület menti megoszlás függvényei a VGB szerint (VGB-Guideline).....	34
15. ábra: A szél dinamikus hatásának függvénye (VGB-Guideline)	36
16. ábra: Hűtőtorny-hűtőtorny interferenciája (VGB-Guideline)	37
17. ábra: Hűtőtorny-épület interferenciája (VGB-Guideline)	38
18. ábra: A héj alakjának ábrázolása diagrammon.....	47
19. ábra: A felépített szerkezet AxisVM X7-ben.....	47
20. ábra: A VEM-moddellre alkalmazott belső szélszívás kerületmenti megoszlása (AxisVM X7).....	51
21. ábra: A VEM-moddellre alkalmazott külső szélnyomás kerületmenti megoszlása (AxisVM X7).....	53
22. ábra: A VEM-moddellre alkalmazott külső szélnyomás magasságmenti megoszlása (AxisVM X7) ...	54
23. ábra: A kritikus teherparaméter meghatározása AxisVM X7-tel.....	55
24. ábra: A kihajlásvizsgálat eredménye felülnézetben (AxisVM X7)	55

8. Képjegyzék

1. kép: A Cruas atomerőmű a Rhône partján (qubit.hu, Michel Gunther/Biosphoto, 2019)	8
2. kép: A hűtőtoronyból távozó párával telített levegő (pixabay.com, Markus Distelrath, 2019).....	10
3. kép: A mesterséges huzatú nedves hűtőtorony metszete (sinobaler.com, 2023).....	11
4. kép: A Forgó-féle apróbordás hőcserélők (omikk.bme.hu, 2018).....	13
5. kép: Természetes huzatú száraz hűtőtorony (mvmegi.mvm.hu, 2021)	14
6. kép: Acélszerkezetű hűtőtorony (Dr. Pálfalvi Dóra, 2018)	15
7. kép: Acél szerkezetű hűtőtorony háromszög hálózata (Xilinhaote, Dr. Pálfalvi Dóra, 2012).....	16
8. kép: Elkészült acél szerkezetű hűtőtorony (Deir Ali, Dr. Pálfalvi Dóra, 2016)	17
9. kép: Elkészült vasbeton szerkezetű hűtőtorony (Németország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2014).....	18
10. kép: Kiszélesedés, X-lábak és a hűtődelták kapcsolata (Törökország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2014).....	18
11. kép: Nedves elven működő hűtőtorony vízgyűjtő medencéje (Schkopau, 1996).....	19
12. kép: Inotai erőmű hűtőtornyai (google.com, 2021).....	19
13. kép: Megépült kábeltorony, még burkolat nélkül (Németország, 1992).....	20
14. kép: Az "X" lábak vasszerelése vízszintes helyzetben (Törökország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2016)	21
15. kép: "X" lábak a végleges helyzetükben (Törökország, Dr. Pálfalvi Dóra, 2012)	22
16. kép: A köpeny indításának kizsaluzása (doka.com, 2022)	22
17. kép: Toronydaru elhelyezkedése a torony közepében (doka.com, 2022).....	23
18. kép: Az SK 175 hűtőtorony zsaluzata (doka.com, 2023).....	24
19. kép: Acél létra a kiszélesedés tetején (Dr. Pálfalvi Dóra, 2016)	25
21. kép: A Ferrybridge-i katasztrófa pillanata (google.com, 2022)	29
22. kép: A Ferrybridge-i hűtőtornyok a katasztrófa után (google.com, 2023)	30
23. kép: A Ferrybridge-i hűtőtornyok látképe a katasztrófa után (google.com, 2022).....	30

9. Táblázatjegyzék

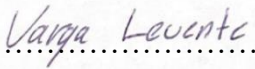
1. táblázat: Az acél és vasbeton hűtőtorony főbb adatai	26
2. táblázat: A felhasznált szabványok	26
3. táblázat: A kerület menti megoszlás maximális értéke az érdeesség függvényében (VGB-Guideline)...	34
4. táblázat: A $c_{pe}(\theta)$ kerület menti megoszlás képletei a VGB szerint (VGB-Guideline).....	35
5. táblázat: Az ellenállásokra vonatkozó parciális biztonsági tényezők értékei (VGB-Guideline)	40
6. táblázat: A hiperbola alakjának összefoglalása	46
7. táblázat: A szélteher magasságmenti változása	50
8. táblázat: A külső szélteher kerület menti megoszlása	52
9. táblázat: A külső szélnyomás kerületmenti eloszlása a 119,40 m magasságban	53

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott Varga Levente hallgató kijelentem, hogy a Hűtőtornyok tervezésének megközelítése építőmérnöki szempontból TMDK dolgozatot a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar Mérnöki és Smart Technológiák Intézet Építőmérnök Tanszékén készítettem.

Kijelentem, hogy a TMDK dolgozat saját munkám eredménye, és kizárólag a megjelölt forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen, az előírásoknak megfelelően megjelöltem. Ugyanígy jártam el a más forrásból átvett illusztrációk (rajzok, ábrák, képek, grafikonok, táblázatok stb.) esetében is.

Pécs, 2023. november 17.


.....

hallgató aláírása