

2. HŐCSERÉLŐ HÁLÓZATOK SZINTÉZISE

2.1. A hőcserélő hálózatok szintézis-feladata

Az **1.1 alfejezetben** felsorolt adatokon túl a hőcserélő hálózat (továbbiakban: HH) szintézis-feladatát még az alábbi adatok is jellemzik:

5. A segédközegek hőtani adatai és megengedett elértéktelenedésük. Például a hűtővíz belépési hőfoka és maximális kilépési hőfoka (valamint fajhője), az alkalmazható fűtőgázok nyomása, hőfoka és párolgáshője, stb.
6. A segédközegek és a munkaközegek (áramok) hőátadást befolyásoló tulajdonságai (viszkozitás, sűrűség és hővezetési tényező a hőmérséklet függvényében, lerakódási készség).
7. A hőátadó egységek (fűtők, hűtők, hőcserélők) típusa és a típus hatása a hőátbocsátásra (falvastagság, hővezetési tényező, módosító tényező a nem tiszta ellenáramú elrendezés figyelembe vételére pl. a járatszám és a terelőlemezek számától függően), valamint a várható nyomásesés függése ezekről.
8. A hőátadó egységek költsége a névleges hőátbocsátási felület függvényében.
9. A segédközegek fajlagos költsége (pl. Ft/köbméter hűtővíz).
10. A gazdasági környezet adatai, pl. az éves értékcsökkenési leírás mértéke vagy a kívánt megtérülési idő.

Az optimális HH kijelölése így nagyon bonyolult feladat, ezért legtöbbször az alábbi közelítő feltételezésekkel élünk:

1. A hőkapacitások konstansok vagy szakaszonként konstansok.
2. Az alkalmazott hőátadó egységeket ellenáramú hőcserélőként számítjuk, és az ellenáramtól való eltéréseket az átlagos hőmérséklet-különbség módosításával vesszük figyelembe. A hőteljesítmény számítására az alábbi általános összefüggést használjuk:

$$Q = kA \Delta T_{\text{átl}}$$

ahol

$$\Delta T_{\text{eff}} = f_{\text{mod}} \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

ahol a módosító tényező után álló kifejezés a jól ismert logaritmikus átlag-hőfokkülönbség. ΔT_1 és ΔT_2 a hőcserélő egy-egy végén mért hőfokkülönbség, azaz a belépő meleg áram és a kilépő hideg áram hőfokkülönbsége és a kilépő meleg áram és a belépő hideg áram hőfokkülönbsége.

3. A k hőátbocsátási tényező részletes hidraulikai és transzport-számításai helyett vagy

(a) átlagos közelítő konstans k értéket használunk, vagy

(b) külön közelítő konstans k értékeket használunk egyes típus-kapcsolásokhoz (pl. külön érték a hűtőkre, külön a gőzfűtésre, külön a közepes sűrűségű szerves anyagok egymás közti hőcseréjére, stb.), vagy

(c) a hőátbocsátási tényezőt az alábbi egyszerűsített képlettel számítjuk:

$$\frac{1}{k_{i,j}} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_j}$$

ahol az egyes áramokhoz rendelt közelítő konstans α hőátadási tényezők értékében figyelembe vettük a fal és a lerakódások ellenállását is.

4. Az egyes hőátadó egységek beruházási költségét a következő képlettel becsüljük:

$$K = c + aA^b$$

ahol A a hőátbocsátó felület, a , b és c konstansok. Legtöbbször $c=0$, a b kitevő pedig 1-nél kisebb szám. Legtöbbször egy-egy melegáram-hidegáram *csatolási ponthoz* egyetlen ilyen hőátadó egységet tervezünk, és annak költségét vesszük figyelembe, de eljárhatunk úgy is, hogy az egyes csatolásokon szabvány hőcserélő egységekkel valósítjuk meg a kívánt hőcserét, és így egy-egy csatoláshoz több szabvány hőcserélő tartozhat. Ez utóbbi esetben a b kitevő értéke 1.

Tapasztalat szerint a HH gazdaságosságára döntő hatással van a kapcsolási rend. A kapcsolási rendet tekintve a következő változatokat kell figyelembe vennünk:

1. Párosítások

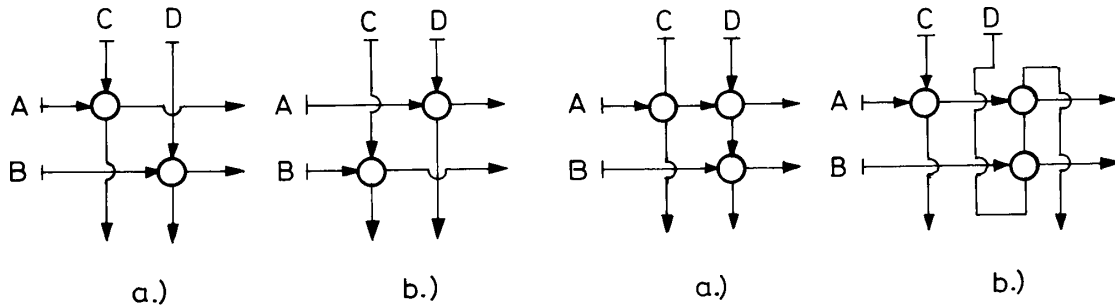
Ezek a legegyszerűbb alternatívák, amiket az **1. ábra** illusztrál: Az A és B áramokat vagy a C és D , vagy a D és C áramokkal csatoljuk.

2. Csatolási sorrendek

Lehetőség van arra is, hogy egy-egy áramot több vagy kevesebb más típusú árammal csatoljunk. Ekkor a különböző csatolási sorrendek különböző hálózatokat jelölnek ki.

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

Ilyen alternatívákat mutat a **2. ábra**. A D áram az A és B áramokkal különböző sorrendekben találkozhat.

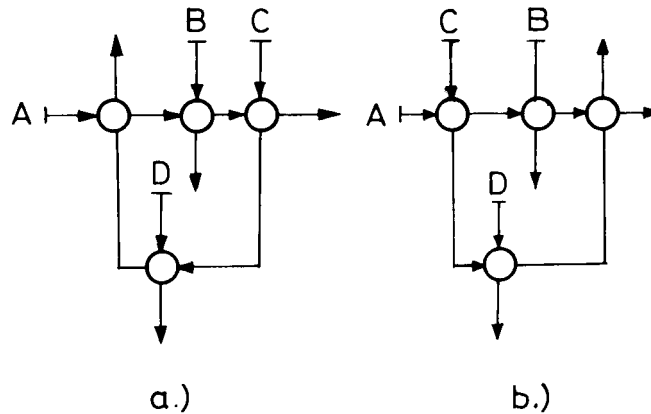


2.1. ábra

2.2. ábra

3. Többszörös csatolások

Ugyanaz a hidegáram-melegáram pár egy hálózatban többször is találkozhat. Ennek természetesen csak akkor van értelme, ha más csatolások ékelődnek közbe. Ilyen esetet mutat a **3. ábra**, két különböző csatolási sorrenddel.



2.3. ábra

4. Elágaztatások

Egy-egy áramot elágaztatva több kisebb kapacitású, de ugyanolyan anyagi tulajdonságú, kiindulási hőfokú és ugyanolyan előírt célhőmérsékletű áramot avagy *ágot* kapunk. Az egyes ágak különböző áramokkal csatolhatók. Elágazó rendszert mutat a **4. ábra**. Az ágak tovább ágaztathatók és tetszés szerint egyesíthetők is.

Az elvben figyelembe veendő kapcsolási rendek számáról képet kaphatunk, ha felmérjük az adott N és M áramok és egy-egy fűtő- és hűtőközeg közötti, **többszörös csatolást és elágazást nem tartalmazó** kapcsolási rendek számát. Ez viszonylag

egyszerű kombinatorikai feladat, ha feltesszük, hogy a hőátadó egységek minimális száma:

$$MIN = (N + 1) + (M + 1) - 1$$

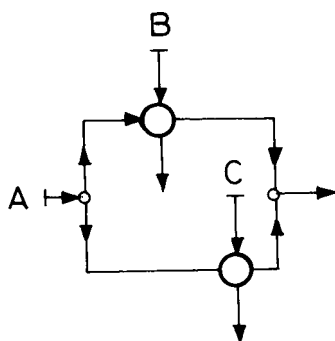
Ez jó közelítő kváziminimum, amit ugyancsak kombinatorikai módon lehet igazolni. A különböző lehetséges csatolások száma viszont:

$$MAX = (N + 1)(M + 1) - 1$$

mivel a segédközegek között nem tervezünk hőcserét. A lehetséges kombinációk száma:

$$C_{\max}^{\min} = \frac{MAX!}{MIN!(MAX - MIN)!}$$

Ez a kifejezés már mérsékelt számú műveleti áram esetén is igen nagy számot ad. A többszörös csatolásokkal a kapcsolási rendek száma sokszorosára nő. Mivel pedig a lehetséges elágaztatások és egyesítések száma gyakorlatilag végtelen, *a lehetséges kapcsolási rendek száma általában csillagászati szám*. Ezek közül kell valamilyen módszerrel kiválasztani az optimális vagy közel optimális kapcsolási rendeket.



2.4. ábra

2.2. Vertikális és cikk-cakkos (párhuzamos és keresztező) hőátadás

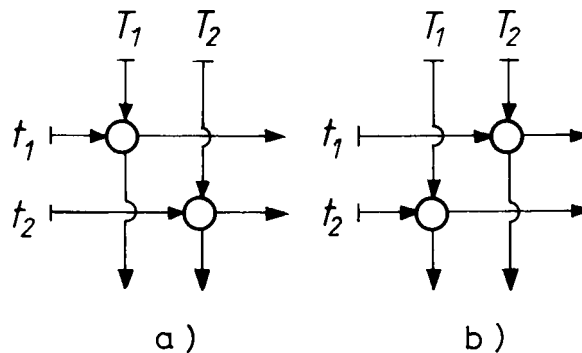
A tapasztalat szerint a maximális energia-visszanyerésű avagy minimális hőforgalmú hőcserélő hálózatok (a továbbiakban ETHH, azaz energia-targeting HH) közel optimálisak. Mindenesetre sokkal közelebb vannak a gazdasági optimumhoz, mint az ellenkező végtel. Ebben a fejezetben elsősorban az ETHH szintézisével foglalkozunk.

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

Általában egy-egy HH-problémához több ETHH megoldás tartozik, s ezek összegzett hőátadó felülete és beruházási költsége különböző lehet. Ebben a fejezetben főleg az olyan hálózatok szintézisével foglalkozunk, melyek ET hálózatok, és *ezen belül* minimális beruházási költségűek vagy minimális hőátadó felület tartozik hozzájuk (feltételes optimum).

Bebizonyítható, hogy az ET mellett minimális felületű HH tervezéséhez az ellenáram elvén alapuló kapcsolási rendet kell kialakítani.

Az egyes hőcserélő egységekre vonatkozó ismereteink alapján analógiával azonnal belátható, hogy az ellenáramtól való eltérés csökkentheti az energia-visszanyerés lehetőségét. A meleg áramok legmelegebb szakaszait a hideg áramok legmelegebb szakaszaival kell csatolni, és viszont. Ellenkező esetben, ha pl. a meleg áramok magas hőmérsékletű szakaszait a hideg áramok alacsony hőmérsékletű szakaszainak melegítésére használjuk, akkor esetleg nem marad elegendő és megfelelő hőmérsékletű hőkínálat a hideg áramok melegebb szakaszaira, pedig ellenáramú kapcsolás esetén lenne elegendő.



2.5. ábra

A minimális felület részleges bizonyításához tekintsük az **5. ábrán** vázolt kétféle párosítást, a megfelelő hőmérsékletekkel. Bevezetve a

$$\Delta_{i,j} = T_i - t_j$$

$$\alpha = \frac{Q}{c}$$

$$\beta = \frac{Q}{C}$$

jelöléseket, a két hőcserélő együttes rögzített Q hőteljesítményéhez tartozó hőátbocsátó felület változása, ha az **5/a ábra** elrendezéséről az **5/b ábra** elrendezésére térünk át, algebrai átalakítások után így írható fel:

$$\Delta A = \frac{(\alpha - \beta)^{-1}}{f_{\text{mod}} k} \left[\left(\ln \frac{\Delta_{1,2} - \beta}{\Delta_{1,2} - \alpha} + \ln \frac{\Delta_{2,1} - \beta}{\Delta_{2,1} - \alpha} \right) - \left(\ln \frac{\Delta_{1,1} - \beta}{\Delta_{1,1} - \alpha} + \ln \frac{\Delta_{2,2} - \beta}{\Delta_{2,2} - \alpha} \right) \right]$$

Tegyük fel, hogy az eredeti, az **5/a ábra** elrendezésének megfelelő esetben az A felület minimális volt. Akkor a felületváltozásnak pozitívnak kell lennie. Innen kapjuk:

$$\frac{(\Delta_{1,2} - \beta)(\Delta_{2,1} - \beta)(\Delta_{1,1} - \alpha)(\Delta_{2,2} - \alpha)}{(\Delta_{1,1} - \beta)(\Delta_{2,2} - \beta)(\Delta_{1,2} - \alpha)(\Delta_{2,1} - \alpha)} \geq 1$$

Vegyük figyelembe, hogy

$$\Delta_{1,1} + \Delta_{2,2} = \Delta_{2,1} + \Delta_{1,2} ,$$

ekkor átrendezéssel kapjuk a következő egyenlőtlenséget:

$$(T_2 - T_1)(t_2 - t_1)[(\Delta_{1,1} - \alpha) + (\Delta_{2,2} - \beta)] \geq 0 .$$

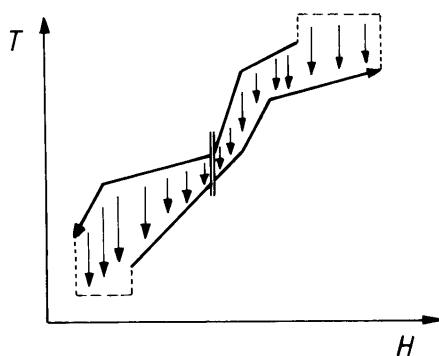
A szögletes zárójelben álló tagok mindig pozitívak, így

$$(T_2 - T_1)(t_2 - t_1) \geq 0$$

A zárójeles tényezők előjele tehát megegyezik. Ez éppen azt jelenti, hogy a melegebb melegáramot a melegebb hidegárammal csatoljuk, és viszont.

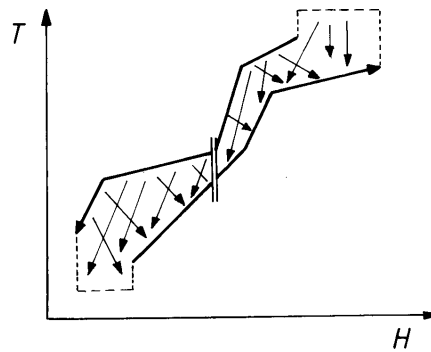
A fenti levezetés akkor is érvényes, ha az egyes áramok ugyanannak az áramnak különböző szakaszai. Ekkor az eredmény azt jelenti, hogy többszörös csatolásnál az ellenáramú kaszkád kapcsolás sorrendje az optimális, és nem az egyenáramú kaszkádé.

A tökéletesen ellenáramú kaszkád kapcsolás és hőátadás azt jelenti, hogy az azonos t hőmérsékletű dt hideg áram szakaszokat az ugyancsak azonos T hőmérsékletű dT meleg áram szakaszokkal csatoljuk. A CC diagramon ez pontosan annak felel meg, hogy az összetett áram vonalak egymást fedő tetszőleges dH entalpia-intervallumaiban történik az energia-visszanyerés. Ehhez az szükséges, hogy a CC diagramon ábrázolva minden dH hőközlés a t -tengellyel párhuzamos, azaz függőleges (vertikális) irányú legyen. Az ilyen hőközlést vázolja a **6. ábra**. A hőközlést jelző irányok egymással (is) párhuzamosak, egymást nem keresztezik.



2.6. ábra

Vertikális hőcsere



2.7. ábra

Keresztező hőcsere

A gyakorlatban az ilyen rendszer megvalósítása az áramok sokszoros elágaztatását igényli és nagyon sok, kisméretű hőcseréhez vezet. A költségfüggvény b kitevője

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

általában 1-nél kisebb szám, így az azonos hőcserélő felületet *kevesebb egységgel* megvalósító rendszerek az olcsóbbak, míg az elaprózott rendszerek nagyon drágák. Ezen felül a bonyolultság növekedése sem éppen előnyös. Ezért ha lehet, elkerüljük az elágaztatásokat, és inkább ún. cikk-cakkos, vagy keresztező rendszereket tervezünk, amit a **7. ábra** mutat. Ezzel növeljük az összfelületet, mégis csökkentjük a költségeket. (A paradox jelenség oka a költségfüggvény nemlinearitása).

Természetesen a cikk-cakkos tervezés és a vertikális tervezés között gazdasági kompromisszumot keresünk. A továbbiakban a cikk-cakkos tervezés olyan korlátozásával kívánunk HH-ot tervezni, mely biztosítja a maximális energia-visszanyerést.

2.3. Pinch tervezés

Az ETHH kijelöléséhez az előző fejezet utolsó alfejezetében leírt három pinch-szabályból kell kiindulni. Az első szabályból következik, hogy a pinch alatti és pinch fölötti részfeladatot egymástól függetlenül is meg lehet oldani. Az alkalmazott szabályok és eljárások a két oldalra nézve szimmetrikusak.

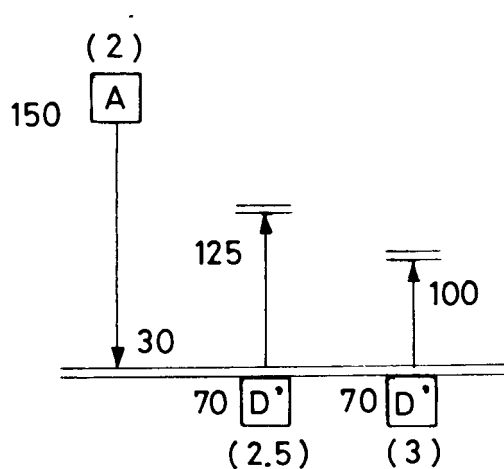
Bármelyik oldalt nézzük is, azt találjuk, hogy a pinch felé haladó áramok igényeit csak a velük szemben haladó, és a pinch azonos oldalára eső áramokkal szabad kielégíteni. Például a meleg oldalon a meleg áramok kínálatát csak hideg áramoknak a meleg oldalra eső szakaszai vehetik fel. A hideg oldalra eső szakaszok azért nem, mert a pinchen keresztül nem cserélünk hőt, külső hűtőközeg pedig azért nem, mert a meleg oldalon nem alkalmazunk hűtést. A pinchtől távolodó áramokra ilyen merev szabályok nem érvényesek. Például a meleg oldalon a hideg áramok igényeit kielégíthetjük meleg áram szakaszokkal (melyek szükségszerűen a meleg oldalon vannak), de külső fűtőközeggel is.

A pinch felé haladó áramok igényeinek a kielégítése tehát nehezebb, mint az onnan távozóké. Ezen belül is a legtöbb gondot azok a pinch felé haladó áramok jelentik, melyek a pinch hőfokát el is érik (vagy át is lépik). Ezeknek kielégítésére ugyanis kizárólag a pinchet átlépő vagy a pinchtől induló áramok alkalmazhatók, ha ETHH kijelölése a cél. Ennek az az oka, hogy a pinch hőfokon az egymással párosítható meleg és a hideg áramok között éppen MAT hőfokkülönbség található, míg a pinchtől távolabbi párosításoknál ennél nagyobb különbség is előfordulhat, illetve általában a nagyobb különbség a jellemző. Erre mindjárt példát fogunk látni.

A pinch közvetlen közelébe eső (a pinch hőfokot érintő) hőátadó egységek kijelölésénél csak azokat az áramokat, illetve áram-szakaszokat vizsgáljuk, melyek a pinch hőfokot érintik. Ezeket *pinch-áramoknak* nevezzük.

Az **1.6 alfejezetben** használt feladat adataival (**1.1. Táblázat**) elvégezzük a pinch-tervezést. A feladat megoldása közben rámutatunk az alkalmazandó tervezési (kijelölési) szabályokra.

Először a meleg oldalt vizsgáljuk. A meleg oldalon egyetlen meleg és két hideg áram szakasz szerepel, mindhárom szakasz pinch-áram. A melegoldali feladatot vázlatosan mutatja a **8. ábra**. Az ábra alján a kettős vonal a két valódi pinch hőfokot jelképezi. Az áramok kiindulási pontjánál kis négyszögbe írtuk az áram vagy áram-szakasz jelét, és mellette zárójelben feltüntettük hőkapacitását. Az áramokat irányított szakaszok jelképezik, melyek a képzeletbeli, felfelé mutató hőfokskála mentén helyezkednek el. Az áramok megfelelő pontjain a vonal mellé írjuk a jellemző hőmérsékleteket.



2.8 ábra

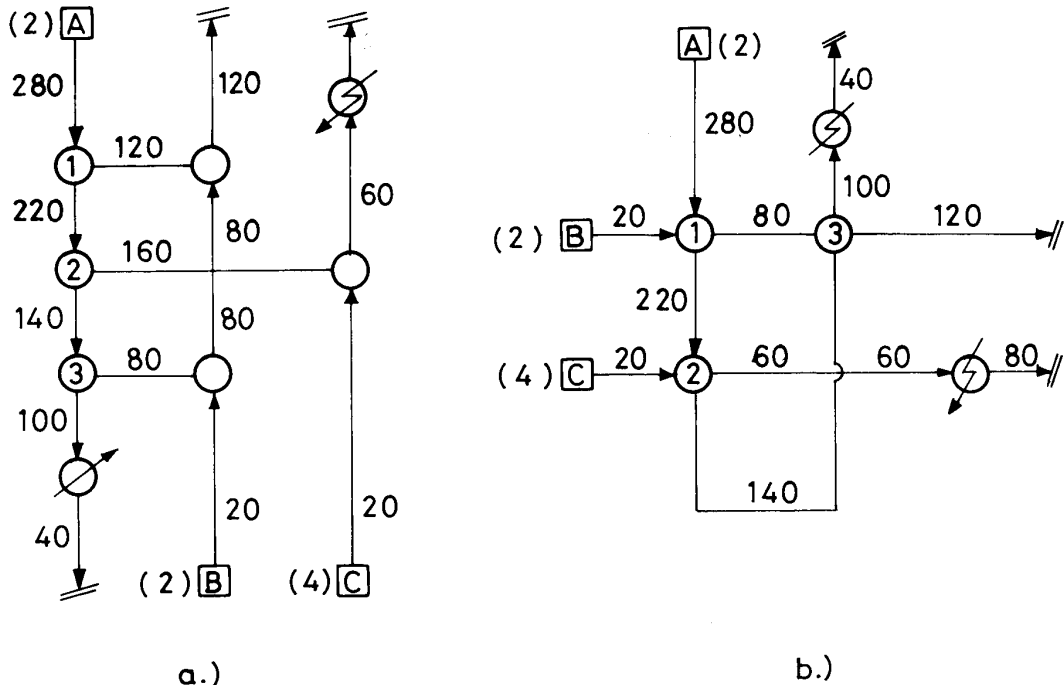
A HH kijelölése azt jelenti, hogy

1. egymáshoz rendeljük a párosított meleg és hideg áram-szakaszokat, valamint az áramokhoz szükség esetén hozzárendeljük a külső segédközeget (fűtés vagy hűtés),
2. ha egy áram(-szakasz) több másikkal és/vagy segédközeggel is találkozik, akkor kijelöljük a találkozások sorrendjét,
3. megadjuk az egyes csatolásokhoz tartozó hőteljesítményeket.

Az 1. és 2. tevékenységek eredményét úgy jelöljük, hogy a csatolt áramokat jelképező vonalakat egy-egy csomóponttal szakítjuk meg, és e csomópontokat keresztirányban összekötjük. Például a **9/a. ábrán** az *A*, *B* és *C* áramok között három csatolást jelöltünk ki, úgy, hogy az *A* meleg áram először a *B* hideg árammal, majd a *C*-vel, végül újra a *B*-vel találkozik. A segédközeget fűtés esetén a hideg áramot a megfelelő ponton egy olyan csomóponttal szakítjuk meg, melyet nem kapcsolunk össze más csomóponttal.

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

Ugyanígy járunk el a meleg áramokon alkalmazott hűtés jelölésénél is. Például a **9/a. ábrán** a *C* hideg áram végén fűtést jelöltünk ki.



2.9. ábra

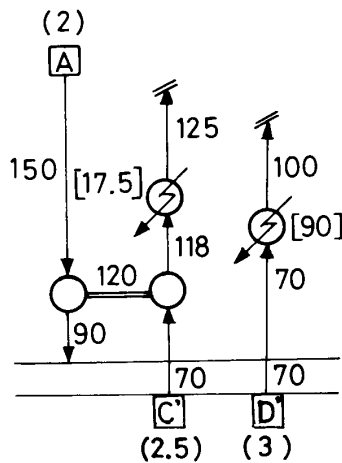
Ezt a jelölésmódot **rácsábrázolásnak** nevezzük. A megfelelő hagyományos folyamatábrát a **9/b. ábrán** mutatjuk be. A rácson a kijelölt hőmennyiséget akár keresztirányú kapcsolatra (vonagra) írhatjuk, akár valamelyik csomópontot jelképező kör vagy sokszög belsejébe. A hőmérsékleteket a csomópontok közé írhatjuk. Ezt a jelölésmódot alkalmazzuk a pinch tervezésnél, hogy áttekinthessük a hőfokviszonyokat. A rácskábrázolás a tervezés későbbi szakaszaiban is hasznosnak fog bizonyulni.

FELADATUNKBAN A MELEG OLDALON egyetlen meleg áram szerepel. Ezt kell a pinch hőfokára eljuttatni a rendelkezésre álló két hideg pinch árammal. Ha a legelső (és ezért talán a későbbieket korlátozó) csatolást tekintjük, akkor csak két választási lehetőségünk van: az *A* áramot vagy a *C'*-vel, vagy a *D'*-vel csatolhatjuk.

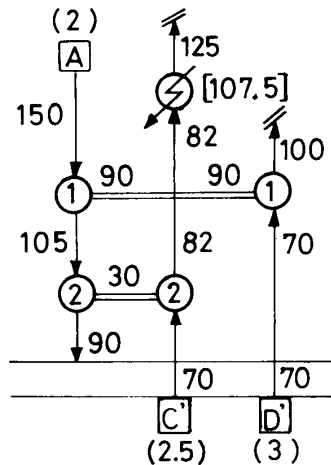
Az első esetben a kijelölés menete egyértelmű. Az eredményt a **10. ábra** mutatja. A *C'* áram fűtési igénye messze felülmúlja az *A* áram kínálatát. Így a *C'* áram végén és a *D'* áram egészére fűtést kell alkalmazni. A fűtőteljesítmények összege éppen 107,5 kW, vagyis a korábban kiszámított minimális fűtés.

A második esetben kétféle módon is kijelölhetjük a hálózat meleg oldalát. Az (a) esetben a természetes logika szerint a *D'* áramot olyan hőcserélőben csatoljuk az *A* árammal, melynek egyik végén bevezetjük a *D'* hideg áramot a pinch (kiindulási) hőfokon és a másik végén bevezetjük az *A* áramot ugyancsak a kiindulási hőfokán. Az *A* áram így 45 fokkal hidegebben lép ki a hőcserélőből, és *maradékát* csatoljuk a *C'*

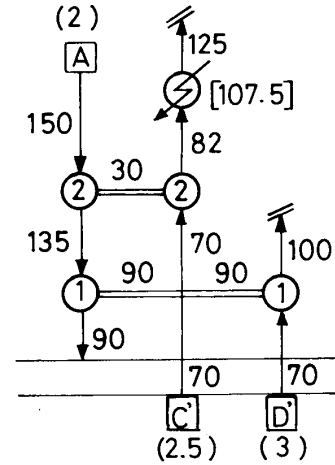
árammal. A (b) esetben a D' áramot olyan hőcserélőben csatoljuk az A árammal, melynek egyik végén bevezetjük a D' hideg áramot a pinch (kiindulási) hőfokon és ugyanazon a végén elvesszük az A áramot ugyancsak pinch (cél-) hőfokon, majd az A áram *kezdőszakaszát* csatoljuk a C' árammal. A kétfajta eredményt a **11. ábra** mutatja.



2.10. ábra



a.)



b.)

2.11. ábra

Az (a) és (b) eset közti különbség látszólag csak a csatolási sorrend. A csatolási sorrenden nem látható, hogy melyik terv felel meg jobban az ellenáram elvének, mert a meleg áramot két, azonos hőfokról induló hideg árammal csatoljuk. A tervezés menete azonban lényegesen különböző: az (a) esetben a két szélső (messze eső) hőfokú áramot csatoljuk, míg a (b) esetben a kisebb hőmérsékletektől a nagyobb hőmérsékletek felé haladunk (fokozatosság, ellenáram).

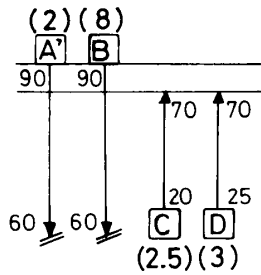
Az eredményt jól mutatják a kijelölt csatolások hőfokkülönbségei. A MAT-hoz képest a következő többleteket találjuk: Az (a) esetben a pinch csatolásnál 0 és 3, a másik csatolásnál 15 és 30. A (b) esetben a pinch csatolásnál 0 és 15, a másik csatolásnál 45 és 58. A (b) esetben tehát a hajtóerők jóval nagyobbak, így várhatóan a hőátadó felület kisebb lesz.

A vizsgált feladat túlságosan egyszerű, így nem mutat példát arra, hogy az (a) típusú tervezés esetenként olyan hőcserélők (csatolások) kijelöléséhez vezet, melyek következtében a meleg áram maradéka nem hűthető le a pinchig. Általában azonban ez a lehetőség fenyeget. Ezért a **pinch tervezést a (b) stratégia szerint végezzük, vagyis a pinch hőfoktól fokozatosan távolodva.**

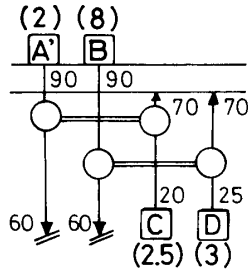
A HIDEG OLDAL TERVEZÉSE közben fogunk találkozni a pinch csatolásokra vonatkozó szabályokkal. A hideg oldalon két meleg áram és két hideg áram szerepel, a **12. ábra** szerint. Összesen két olyan csatolás tervezhető, melyek érintkeznek a pinchessel. Ezeket kétféleképpen jelölhetjük ki, ez a két eset látható a **13. ábrán**.

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

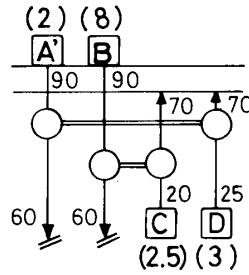
A **13/a ábra** esetében vizsgáljuk meg az $A'-C$ csatoláshoz tervezhető hőteljesítményt! Ne felejtjük el, hogy pinch csatolást tervezünk, tehát mind a meleg, mind a hideg áram



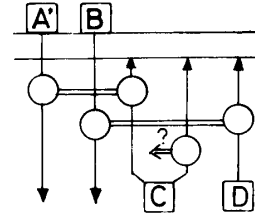
2.12. ábra



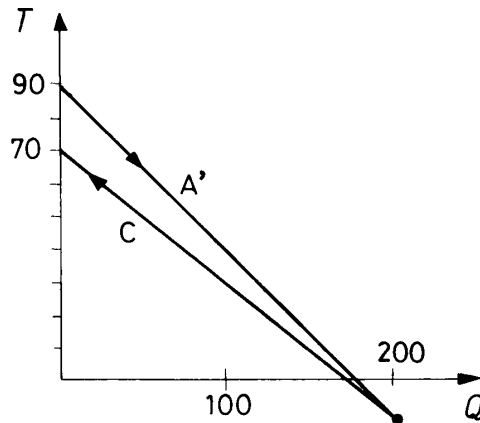
a.)



b.)



2.15. ábra



2.14. ábra

meleg vége pinch hőfokú. A **14. ábra** mutatja a hidegvégi hőmérsékleteket a hőteljesítmény függvényében. Látható, hogy a meleg áram gyorsabban hűl, mint ahogy a hideg áram melegszik. Ennek az az oka, hogy a meleg áram hőkapacitása kisebb ($2 < 2,5$). Ennek következtében tetszőlegesen kicsiny hőteljesítmény mellett is kisebb a hidegvégi hőfokkülönbség, mint MAT. Tehát ETHH tervezéséhez az $A'-C$ csatolást nem jelölhetünk ki a pinchnél. Ugyanez a probléma merül fel a **13/b ábra** $A'-D$ kapcsolásánál is ($2 < 3$). A pinch csatolás előfeltétele, hogy hideg oldalon a meleg áram, meleg oldalon a hideg áram hőkapacitása ne legyen kisebb a hozzárendelt áram hőkapacitásánál. Általában a pinchtől távozó és oda érkező, egymással csatolt pinch áramokra teljesülnie kell a

$$C_{\text{távozó}} \geq C_{\text{érkező}}$$

feltételnek, hogy a pinch csatolás megvalósítható legyen. Ez a feltétel a pinch áramok összegére mindig teljesül:

$$\sum_i C_{i,távozó} \geq \sum_j C_{j,érkező}$$

különben máshol lenne a pinch. Ha az összes lehetséges kapcsolási kombináció egyikében sem teljesül maradéktalanul a fenti feltétel, akkor az áramok elágaztatásával lehet olyan kapacitásokat kialakítani, amik lehetővé teszik a feltétel teljesítését.

Az elágaztatásoknál azonban ügyelni kell az áramok számának viszonyára is. Például ha a vizsgált feladatban elágaztatjuk a C áramot, mondjuk 0,2 - 2 arányban ($C1$ és $C2$ áramok), akkor az A' áram csatolható a $C2$ árammal és a B áram a D árammal (**15. ábra**). Vizsgáljuk meg, hogy ekkor mi melegítheti fel a $C1$ áramot a pinch hőfokára!

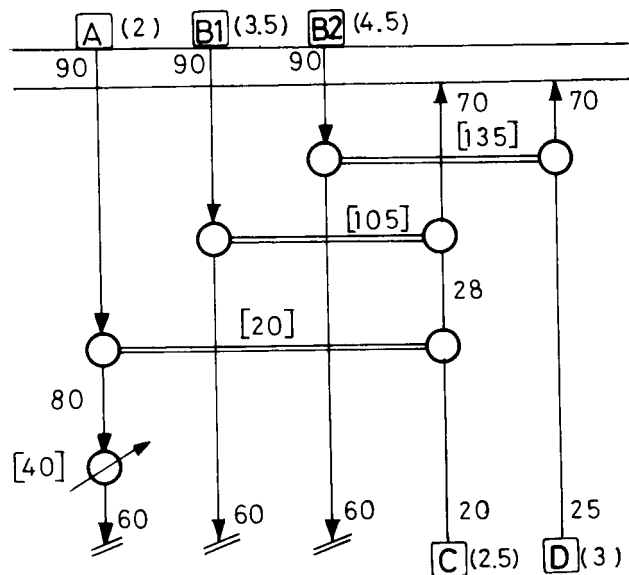
Elvben három lehetőségünk van $C1$ felmelegítésére:

1. Külső fűtés.
2. Meleg áramok pinchnél melegebb szakaszai.
3. Az A' áram vagy a B áram maradéka.

Az 1. esetet a pinch-szabályok kizárják: ne fűtsünk a pinch alatt.

A 2. esetet is a pinch-szabályok zárják ki: ne cseréljünk hőt (ne fűtsünk vagy hűtsünk) a pinchen keresztül.

A 3. eset sem valósítható meg. Ugyanis a pinch csatolások következtében a maradékok hőfoka kisebb a pinch hőfoknál. Ugyanakkor a $C1$ áramot pinchig kell melegíteni, ezért nincs meg a kívánt MAT-nyi különbség a csatolás melegvégén.



16. ábra

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

Látható, hogy a hideg oldalon a hideg pinch áramok pinchig való felmelegítéséhez legalább annyi meleg pinch áramra van szükség. Ezzel szimmetrikusan, a meleg oldalon a meleg pinch áramok pinchre hűtéséhez legalább annyi hideg pinch áramra van szükség. Általában szükséges, hogy a pinchtől távozó áramok száma ne legyen kisebb az oda érkezők számánál:

$$N_{\text{távozó}} \geq N_{\text{érkező}}$$

Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor megint csak az áramok elágaztatásával lehet segíteni rajta. Esetünkben nem a C áramot kell elágaztatni, mert azzal elrontjuk az áramok létszámára egyébként teljesülő feltételt, hanem pl. a B áramot célszerű elágaztatni.

Hogy a B áramot milyen arányban célszerű elágaztatni, arra nézve nincs általános szabály. Egy lehetséges tervváltozatot mutat a **16. ábra**.

Hangsúlyozzuk, hogy a fenti feltételek csak az ETHH kijelöléséhez szükségesek. Tervezhető és működtethető olyan HH, mely e feltételeket megsérti.

2.4. Távol a pinchtől: maradék-feladat, hajtóerő profil, ciklustörés

Az előző alfejezet csak a pinch csatolások kijelölésére ad szabályrendszert. A pinchtől távoli helyekről csak annyit állít, hogy a pinchtől fokozatosan távolodva kell kijelölni a csatolásokat. Erre a részproblémára három különböző megoldási stratégia ismert:

1. Maradék-feladat ellenőrzése (*Remaining Problem Analysis, Hidden Pinch*).
2. Hajtóerő-profil (*Driving Force Plot*) alkalmazása.
3. Hőfok-kintervallumonkénti tervezés (*TI method*), majd fokozatos fejlesztés ciklustöréssel (*Shifts and Loops, Loop Breaking*)

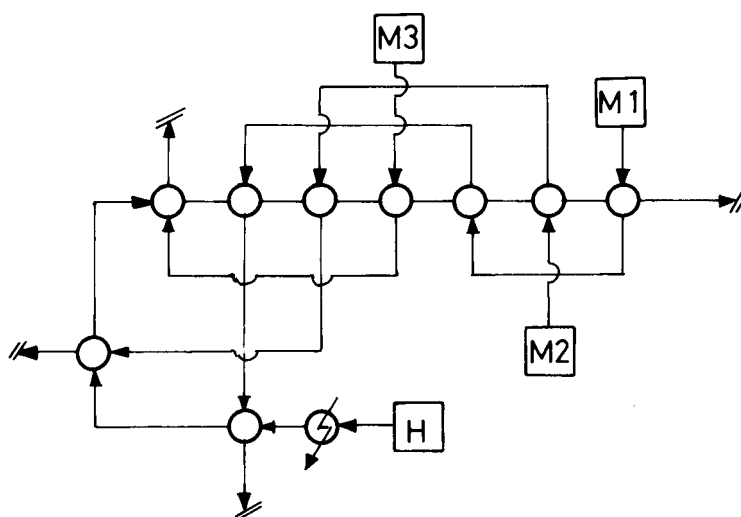
2.4.1. A maradék-feladat ellenőrzése és rejtett pinch

A hagyományos (a pinch előtti időkből származó) HH szintézis legegyszerűbb, és széles körben alkalmazott módszere volt az ellenáramú kaszkád rendszerek kialakítását célzó ún. "gyors algoritmus", melynek lényege abban foglalható össze, hogy a legnagyobb *kiindulási* hőfokú meleg áramot a legnagyobb *célhőfokú* hideg árammal csatoljuk, és a lehető legnagyobb hőteljesítményt tervezzük a két áram között. A

csatolás kijelölése után az áramok maradék szakaszaiból és a többi áramból maradék feladatot képezve arra ismételten alkalmazzuk e szabályt, míg csak csatolás lehetséges.

Az elgondolás szerint a "meleget a meleggel" elv alkalmazása biztosítaná az ellenáramú kapcsolás kialakulását, a maximális hőteljesítmény alkalmazása pedig a minimális bonyolultságot, minimális számú csatolást.

Hogy ezt nem mindig sikerül elérni, arra jó példa egy egyetlen meleg és három hideg áramot tartalmazó feladat megoldása a gyors algoritmussal (**17. ábra**) és más módszerekkel (**18. ábra**). A hőfokkülönbségek ismételt csökkenése elaprózott kaszkádkhoz vezet, sőt, egyes esetekben a pinch figyelmen kívül hagyásával az energiafogyasztás is nagyobb a szükségesnél. Az algoritmus a hideg oldalról is elkezdhető ("hideget a hideggel"), a kétféle tervezés merőben eltérő eredményre vezethet, és bizonyos esetekben a kijelölt áram-pár egyáltalán nem csatolható, hanem a soron következő legmelegebb (leghidegebb) áramot kell választani.



2.17. ábra

Ennek ellenére a pinch tervezés elvégzése után, külön a meleg és külön a hideg oldal tervezésére felhasználható a gyors algoritmus, de csakis a következő módosításokkal:

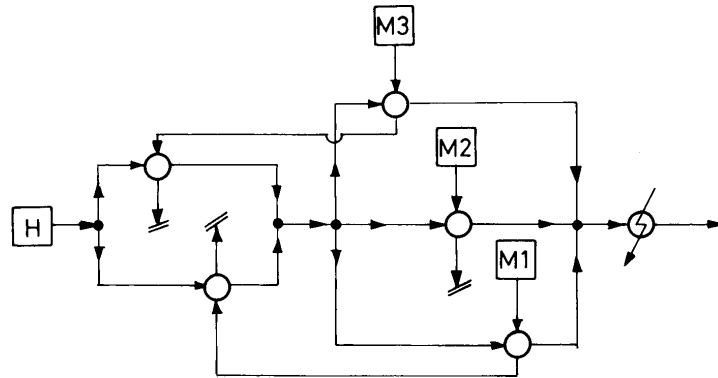
1. A hideg oldalon a melevévről, a meleg oldalon a hidegvévről kezdjük a tervezést (a pinchtől távolodva tervezünk).
2. A gyors algoritmus szerinti csatolások alkalmasságát (helyességét) minden alkalommal ellenőrizzük a maradék-feladat hőkaszkád-számításával. Ha a maradék-feladat ellenőrzése azt mutatja, hogy a kijelölt csatolás eredményeképpen a szükséges külső hőforgalom megnő, akkor a csatolás hőteljesítményét csökkentjük.

Példa.

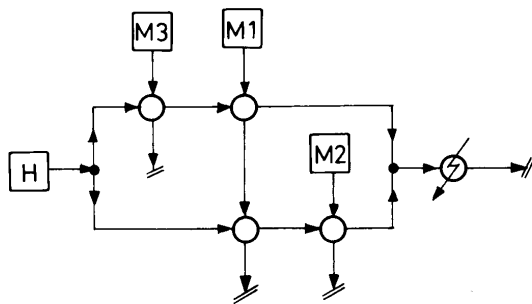
2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

Legyen az aktuális hideg oldali feladat vagy korábbi lépések eredményeképpen megmaradt feladat az, amit az **1. Táblázat** foglal össze.

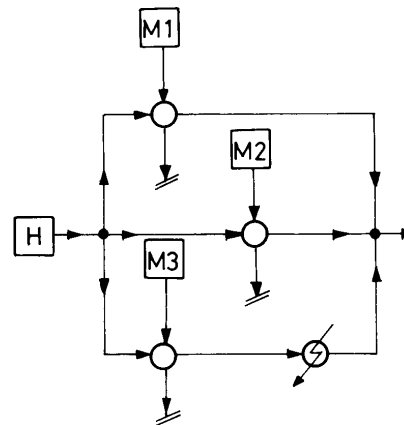
Az **1. táblázat** adatai alapján a hőcserélő hálózat szintézisét mutatja a **19. ábra**. A kaszkád tetején nulla fűtéssel számoltunk (hideg oldali részfeladat), s hogy valóban itt van a pinch, az abból derül ki, hogy a legmagasabb hidegáram-hőfok éppen MAT-tal kisebb a legmagasabb melegáram-hőfoknál.



2.18. ábra a./



b./



c./

2.18. ábra

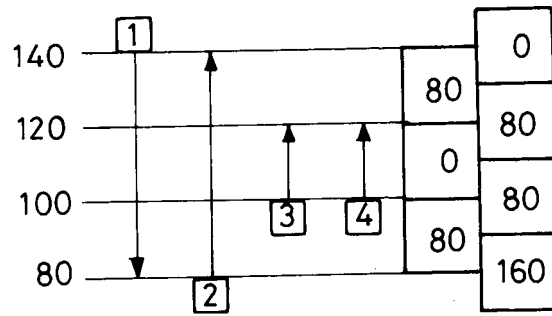
1. Táblázat: Példa a maradék-feladat ellenőrzésére

MAT = 20		belépő hőfok	kilépő hőfok	hőkapacitás
áram színezet	áram sorszám			
meleg	1	150	90	8
hideg	2	70	130	4
	3	90	110	2

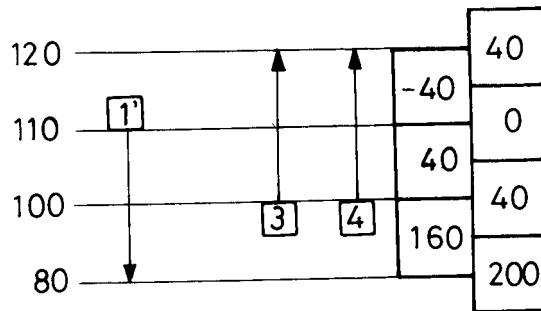
	4	90	110	2
--	---	----	-----	---

Ha most a pinch és a gyors algoritmus szabályai szerint maximális hőteljesítményű csatolást jelölünk ki az 1. és a 2. áram között, akkor a maradék-feladat hőkaskádját a **20. ábra** szerint kapjuk. (E konkrét esetben a maximális hőteljesítmény kimeríti a 2. áram fűtési igényét.) A kaskád tanúsága szerint a maradék-feladat minimális fűtése 40 egység. Csakhogy ez korábban nulla volt! Nem is lehetett más a pinch alatti, *hideg* részfeladatban.

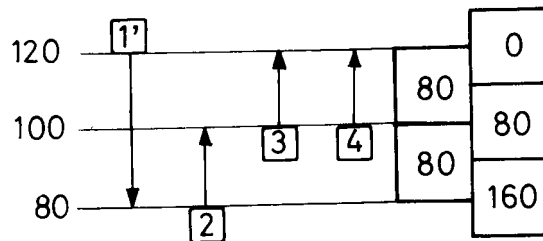
2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise



2.19. ábra



2.20. ábra



2.21. ábra

Következésképp a kijelölt csatolás vagy nem megfelelő párosítású vagy túl nagy hőteljesítményű, és ezzel akadályozza az ETHH kijelölését. Az első feltevés biztosan téves, hiszen ez pinch csatolás. Csökkenteni lehet viszont a csatolás kijelölt hőteljesítményét egy olyan értékre, melynél a maradék-feladat fűtési igénye nulla marad. Azt a legnagyobb hőteljesítményt, melynél ez még éppen teljesül, megengedhető

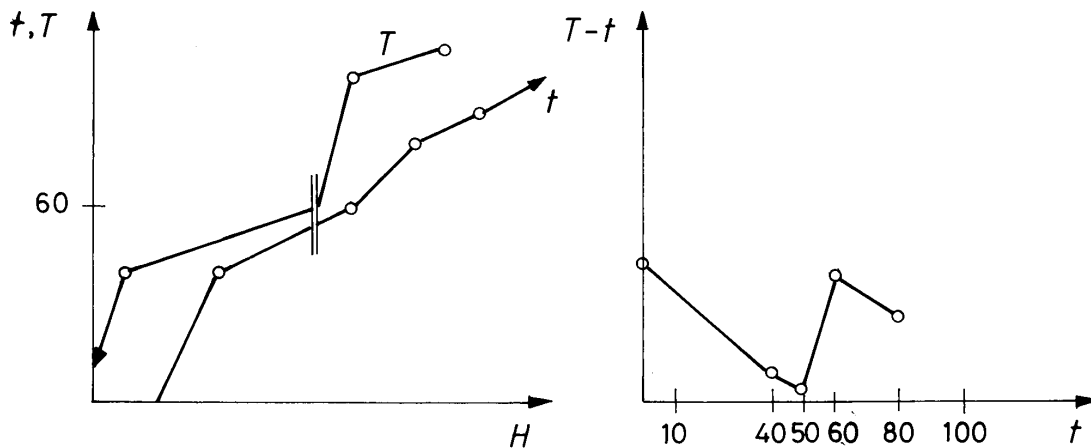
csatolási teljesítménynek hívjuk, és vagy egzakt algebrai kifejezéssel, vagy fokozatos közelítéssel lehet meghatározni. Ha ezt alkalmazzuk a vizsgált feladatra, akkor maradék-feladatként a **21. ábra** szerinti kaszkádot kapjuk.

Az utóbbi ábrából jól látszik, hogy a megengedhető csatolás alkalmazásának eredményeképpen új pinch helyzet keletkezik 120 foknál, és az 1. áramot majd elágaztatva, párhuzamosan a 3. és a 4. árammal kell csatolni ETHH kijelöléséhez. Az ilyen új pinch helyzeteket rejtett pinchnek nevezzük (*hidden pinch*).

2.4.2. Hajtóerő-profil alkalmazása

A hajtóerő-profil (*Driving Force Plot*) a CC-diagramból képezhető úgy, hogy akár a hideg összetett áram hőfoka, akár a meleg összetett áram hőfoka függvényében ábrázoljuk a két összetett vonal közti aktuális hőmérséklet-különbséget (vagyis a hőcsere hajtóerejét). Az így kapott függvénynek a pinchnél minimuma van: *unshifted* esetben a minimum éppen a MAT, *shifted* esetben a minimum értéke nulla.

Például a **22. ábra** CC-diagramjából nyerhető a **23. ábra** hajtóerő-profilja.



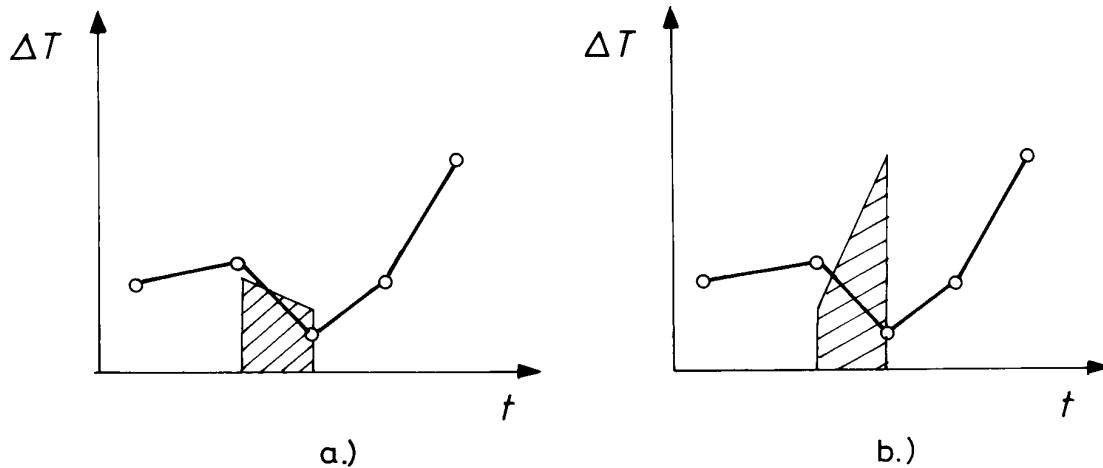
2.22. ábra

2.23. ábra

A hajtóerő-profil a szintézisben úgy használható fel, hogy az aktuálisan kijelölt csatolás jellemző hőfokaiból (a két belépő és két kilépő hőfokból) ugyanilyen diagramot készítünk (ez egy trapéz, mely a független változó tengelyén áll), és ezt összehasonlítjuk a hajtóerő-profil megfelelő szakaszával. Az a jó terv, melynek csatolásai belesimulnak a hajtóerő-profil vonalába. Például a **24/a ábra** egy jól illeszkedő csatolás vázlatát, míg a **24/b ábra** egy rosszul illeszkedő csatolás vázlatát mutatja.

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

Ennek elvi alapja az a megfontolás, hogy a hajtóerők egyenletes kihasználása közel vertikális hőcseréhez és ellenáramú kaszkádkhoz vezet, míg az ellenkező értelmű tervezés erősen cikk-cakkos (keresztező) tervet eredményez. Valóban, ha a kijelölt csatolás valamelyik hőfokkülönbsége lényegesen nagyobb a hajtóerő-profil által megszabottnál, akkor az szükségszerűen keresztező irányú hőcseréhez tartozik. Másrészt viszont, ha a jellemző hőfokkülönbség csak töredéke a hajtóerő-profil által javasoltnak, akkor a kihasználatlan hajtóerő máshol fog jelentkezni, és ott erősen túllépi a javasolt értéket, ami szintén keresztező irányú hőcserét jelent.



2.24. ábra

Nem ismeretes egzakt mennyiségi kritérium arra, hogy mikor fogadható el egy csatolás "jól illeszkedőnek". A tervezőre van bízva, hogy ezt a heurisztikus szabályt művészetl alkalmazza.

2.4.3. Hőfokintervallumok és ciklustörés

Ez az eljárás három fő lépésből áll. Az első két lépésben biztosítjuk az ETHH szintézisét, a harmadik lépésben pedig fokozatosan csökkentjük a csatolások számát.

Az első két lépést (ETHH kijelölését) a **2. Táblázat** mintapéldáján illusztráljuk:

Az első lépésben az egyes hőfok-intervallumokban egymástól függetlenül maximális energia-visszanyerést eredményező kapcsolásokat jelölünk ki.

Mintapéldánkban a hőkaszkád-számítás eredményeképpen azt kapjuk, hogy minimális fűtés 60 egység, a minimális hűtés 225 egység, a meleg pinch hőfok 150 fok, a hideg pinch hőfok 140 fok. A feladatban 5 intervallum képződik, felülről a 2. és a 3.

intervallum közt helyezkedik el a pinch. Az intervallumonkénti tervezés eredményét a **25/a.** ábra mutatja.

2. Táblázat: Példa a hőfok- intervallumonkénti tervezésre

MAT = 10		belépő hőfok	kilépő hőfok	hőkapacitás
áram színezet	áram sorszám			
meleg	1	180	40	2
	2	150	40	4
hideg	3	60	180	3
	4	30	105	2,6

A második lépésben az intervallumok közötti visszanyerést maximalizáljuk, valamint csökkentjük az egységek számát. A szomszédos intervallumok azonos szélein található fűtő-hűtő párokat teljesen vagy részlegesen csatolássá vonjuk össze. A hasonlóképpen szomszédos elhelyezkedésű csatolásokat egymással vonjuk össze.

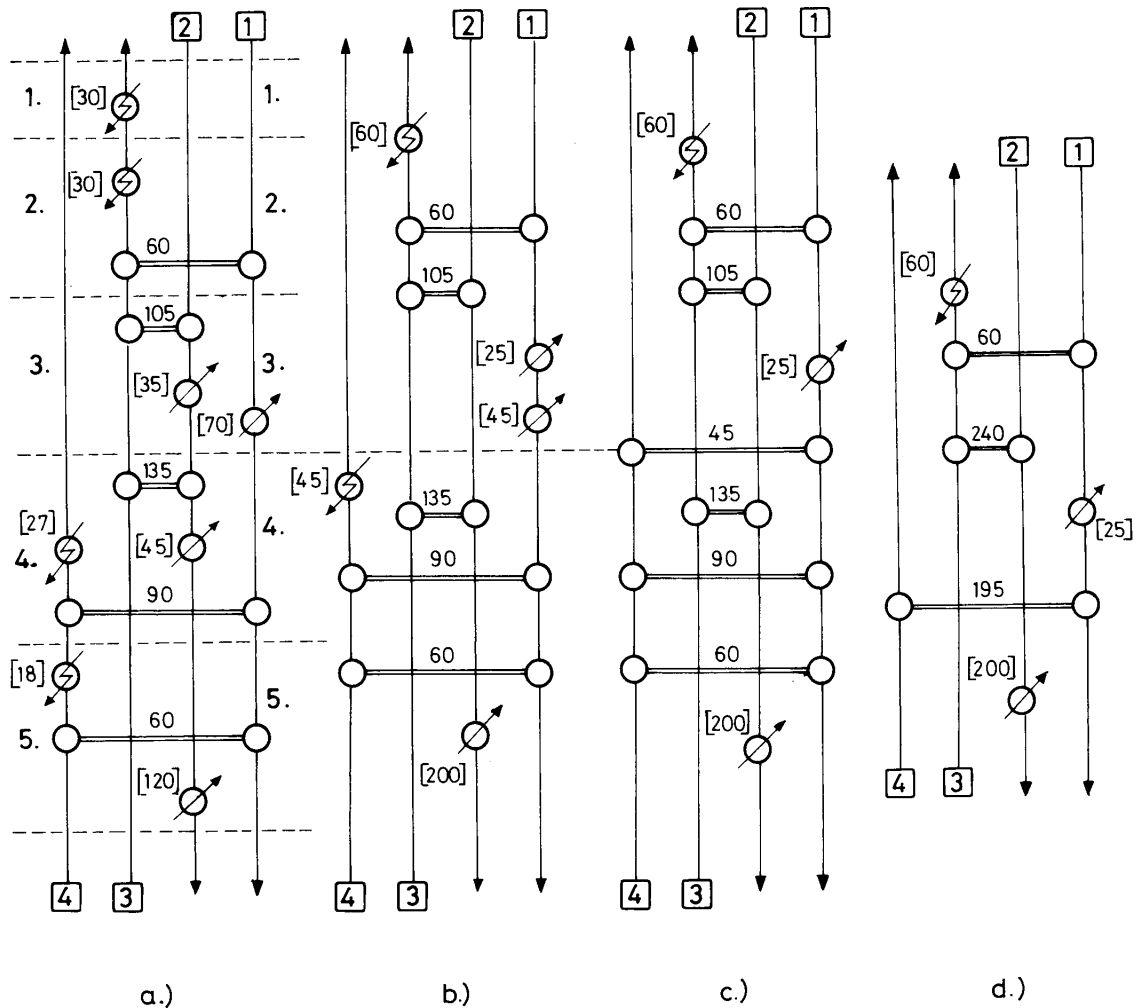
Mintapéldánkban ezt az összevonást három szakaszban mutatjuk be. Először is összevontuk az 1. intervallum és a 2. intervallum 30-30 egységnyi teljesítményű fűtését. A 4. intervallum 45 egységnyi hűtését összevontuk az 5. intervallum 120 egységnyi hűtésével, és a 3. intervallum 35 egységnyi hűtését a 4. intervallum 135 egységnyi teljesítményű csatolásának hideg oldalára áthelyezve egyetlen, 200 egység teljesítményű hűtést jelöltünk ki. A 3. intervallum hűtését át lehetett helyezni a másik oldalra, mert az érintett csatolás hőfokkülönbségei az áthelyezés után is MAT-nál nagyobbak maradtak. Ugyancsak lehetséges volt az 5. intervallum 18 egységnyi fűtését áthelyezni a 4. intervallum 90 egységnyi csatolásának meleg oldalára, és így azt összevontuk az ott található 27 egységnyi fűtéssel. Az így kapott 45 egységnyi fűtéssel ugyanennyi hűtést állítottunk szembe a 3. intervallum 70 egységnyi hűtésének kettébontásával. A **25/b. ábrán** ezt az állapotot rögzítettük.

Ezután, mivel az egymással szembeállított fűtés és hűtés egy intervallumhatár két oldalára esik, ezek összevonhatók, és egy 45 egység teljesítményű csatolás képezhető belőlük. Ezt az állapotot mutatja a **25/c. ábra**. Ebben a lépésben 45 egységgel csökkentettük a kijelölt fűtést és hűtést, melyek így már minimálisak. Ez abból is látszik, hogy a pinch alatt nincs fűtés, felette nincs hűtés, és rajta keresztül nincs hőátadás.

Végül összevontuk a szomszédos csatolásokat. A 2. meleg áram és az 1. hideg áram közti 105 és 135 egység teljesítményű csatolások szomszédosak és összevonhatók. Az 1. meleg áram és a 2. hideg áram közti 45, 90 és 60 egység teljesítményű csatolások

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

szintén szomszédosak és összevonhatók. E két összevonás eredményét mutatja a **25/d.** ábra.



2.25. ábra

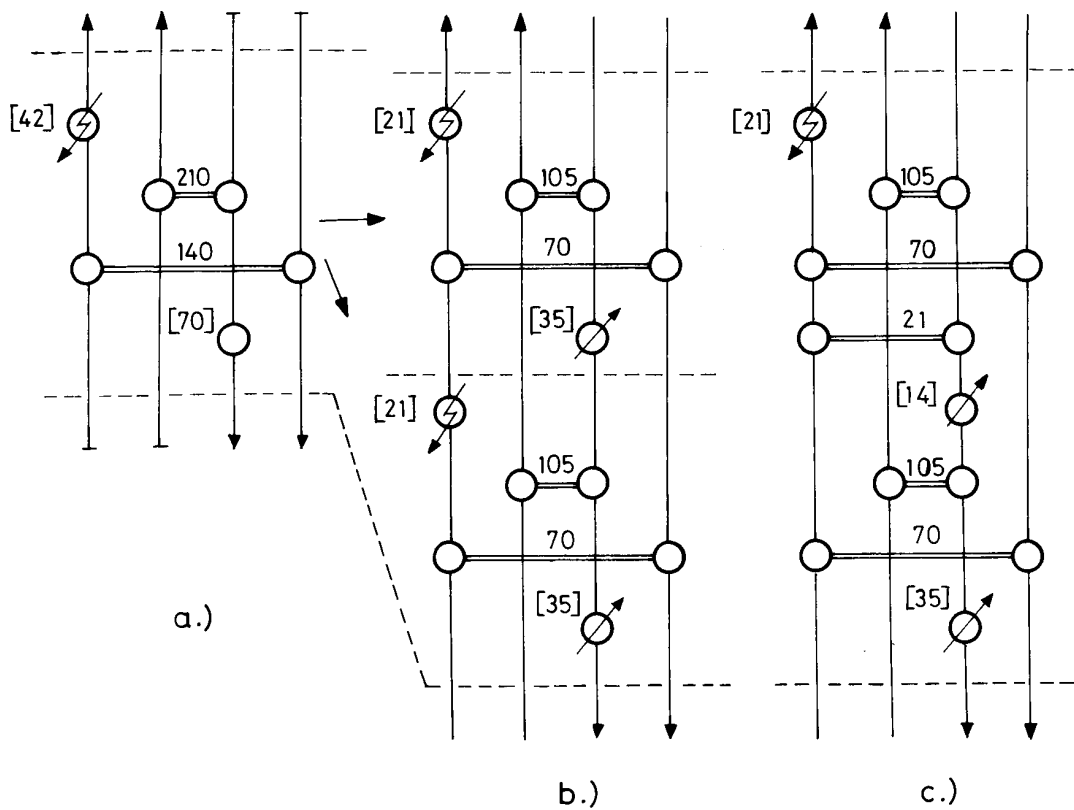
Előfordulhat, hogy a megoldás nem ilyen egyszerű. Egy másik feladathoz tartozik a **26/a ábrán** mutatott intervallum, melynek két szélén egy-egy olyan hűtés és fűtés helyezkedik el, melyeket az adott teljesítmény esetén nem tudunk a szomszédos csatlósokon áthelyezni. Ekkor ezek teljesítménye csökkenthető pl. az intervallum hosszának felezésével és a struktúra megkettőzésével, a **26/b ábrán** mutatott módon. A kettőzés eredményeképp a belülről eső fűtés és hűtés megfelelő része összevonható, így kapjuk a **26/c ábra** rendszerét. Ez az eljárás szükség szerint ismételhető.

A vizsgált feladatban az első két lépés eredményeképp egyszerű szerkezetű ETHH-t kaptunk. Előfordul azonban, hogy az eredmény túl sok csatlós bonyolult

kapcsolásainak rendszere. A bonyolultság és a beruházási öltések csökkentését célozza a 3. lépés.

A 3. lépésben csökkentjük a hőátadó egységek (csatolások, fűtések és hűtések) számát. A gráfelmélet szerint (Euler) egy irányítatlan gráfban a csomópontok P száma, az azokat összekötő élek E száma, a független ciklusok C száma és a gráf (egymással élel össze nem kapcsolt részgráfjainak, azaz) komponenseinek K száma között a következő összefüggés érvényes:

$$E = P + C - K$$



2.26. ábra

A hőcserélő rendszerek rácsábrázolása olyan gráf, melynél az áramok jelentik a csomópontokat, és az áramokat összekötő hőcserélők az éleket. Ennélfogva az egyenlet így írható:

$$N_{\text{egységek}} = N_{\text{források}} - N_{\text{nyelők}} + C - K$$

A források a meleg áramok és a külső hőforrás (fűtőközeg), a nyelők a hideg áramok és a külső hőnyelő (hűtőközeg). Ciklust nem tartalmazó összefüggő HH esetén az egységek kváziminimuma így:

$$N_{\text{min}} = N_{\text{források}} - N_{\text{nyelők}} + 0 - 1$$

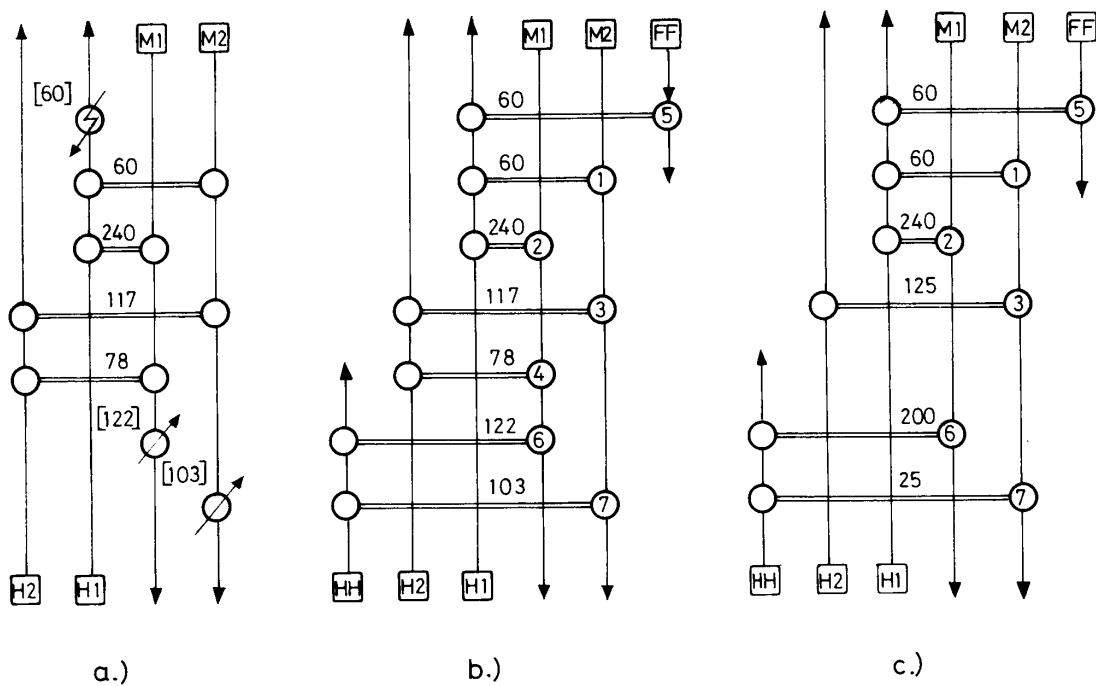
2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

E kváziminimumnál kevesebb egységet csak olyan HH tartalmazhat, melyben bizonyos források együttes hőkínálata egzaktul és megbízhatóan kielégíti bizonyos nyelők együttes fűtési igényét. Ebben az esetben a HH több komponensre esik szét. Ennek valószínűsége nagyon kicsi, így a továbbiakban a fenti kváziminimumot tekintjük minimumnak, és feltesszük, hogy a HH összefüggő. (Ha mégsem, akkor az alábbiakban vázolt eljárást a HH komponensein hajthatjuk végre).

Következésképpen, ha a kváziminimumnál több hőközlő pont van a HH-ban, akkor a HH gráfjában valahol ciklust találunk. A ciklusok egy-egy csatolás-tagját és vele együtt a ciklust úgy szüntetjük meg, hogy a kiválasztott (lehetőség szerint kis teljesítményű) csatolás hőteljesítményét a ciklus többi tagjával vonjuk össze.

Példaként tekintünk a **27/a ábrán** vázolt rendszert, illetve annak kiegészítését a külső forrással és nyelővel, amit a **27/b ábra** mutat.

A strukturában 7 csatolás található, míg a kváziminimum $3+3-1=5$. Ciklusok is vannak azonban a rendszerben, mégpedig 1: az egységek szerint a 3-4-6-7-3 ciklus (az áramok szerint a M2-H2-M1-H3-M2 ciklus), és 2: az egységek szerint az 1-2-4-3 ciklus (az áramok szerint a M2-H1-M1-H2-M2 ciklus).



2.27. ábra

Az egyik ciklus (bármelyik) nagyon egyszerűen megszüntethető. A 4. csatolás 78 egységnyi teljesítményét átadhatjuk a 3. csatolásnak, így kapjuk a **27/c ábrát**, amin eggyel kevesebb csatolás és eggyel kevesebb ciklus található. A maradék ciklust az 1-7-6-2-1 csatolások alkotják.

2. fejezet: Hőcserélő hálózatok szintézise

A kijelölt csatolás két irányba is szétesztható, illetve az egész ciklus módosulhat. Szükség esetén elágaztatással elősegíthető az átcsoportosítás. Az átcsoportosítás ilyen módosulataira azért van szükség, mert nem minden átcsoportosítás után maradna meg minden csatolásnál a legalább MAT hőfokkülönbség.