

1. ENERGIA-TARGETING ÉS A PINCH ALAPJAI

1.1. Kitérő: egyszerűsített hővisszanyerési probléma

A pinch technika grafikusán és numerikusan is tárgyalható és alkalmazható. A grafikus technika az alkalmazáshoz nem szükséges, viszont nagymértékben megkönnyíti az alapelvek és az alkalmazott numerikus technika megértését.

Mind a grafikus, mind a numerikus technika legegyszerűbben az egyszerűsített hőcserélő-rendszer szintézisproblémán magyarázható el. Ez pedig a következő:

Tekintsünk egy technológiai rendszert (üzemet, üzemcsoportot, eljárást, stb.), melynek egységei közt folyadékok és/vagy gázok áramlanak. Az áramok az egyes készülékekből meghatározott hőmérsékleten lépnek ki, és a másik készülékbe előírt hőmérsékleten kell, hogy belépjenek. A két készülék közti úton a nyomás változását elhanyagoljuk. Az áramok fajhője adott és ismert, a hőmérséklettől független állandó érték. Adott és ismert az áramló anyagok mennyisége is. Ennélfogva a készülékeket összekötő anyagáramokon ismert mértékű fűtést vagy hűtést kell alkalmazni, hogy a kívánt hőmérsékletet elérjék.

Az előírt fűtések és hűtések megvalósíthatók az üzemben korlátlanul rendelkezésre álló és elegendően magas vagy alacsony hőmérsékletű fűtő- és hűtőközegekkel (hőforrásokkal és hőnyelőkkel). A hőközlések egésze vagy egy része azonban megvalósítható úgy is, hogy a hűtendő áramok hőkínálatát használjuk fel a fűtendő áramok hőigényének kielégítésére. Ennek előfeltétele, hogy a kínálati oldal melegebb legyen az igénylő áramnál.

A feladat a (gazdaságilag) optimális hőcserélő hálózat kijelölése, figyelembe véve a lehetséges kapcsolásokat, a hőcserélő egységek beruházási költségeit és az energiaárakat. A fő kérdés a hálózat szerkezete (strukturája), azaz a kapcsolási rend: mely fűtendő áramokat mely hűtendő áramokkal kapcsoljuk össze, és milyen sorrendben. Tapasztalat szerint a kapcsolási rend döntő hatással van az elérhető gazdaságosságra. Példaképpen egy bonyolult kapcsolási rendet mutat az **1. ábra**.

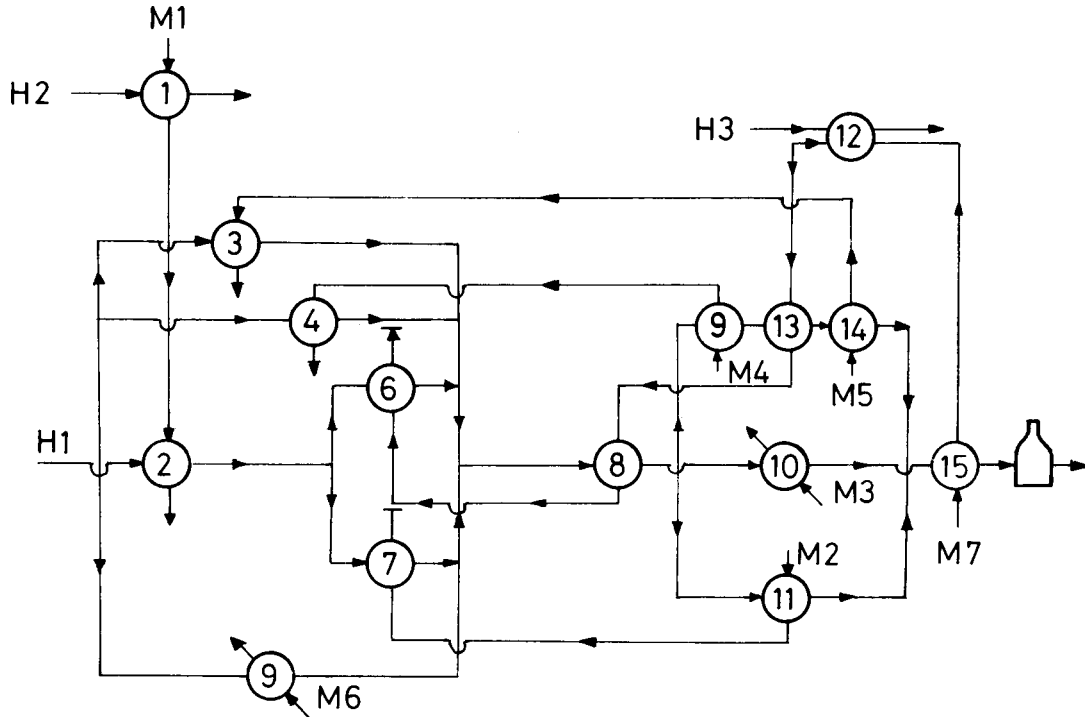
Az *energia-targeting* kérdése ennél lényegesen egyszerűbb: **Mielőtt egyáltalán megvizsgálánk, hogy milyen kapcsolási rendek képzelhetők el, és azok milyen költségekkel járnak, határozzuk meg az energiavisszanyerés elvi maximumát, azaz a szükséges fűtés és hűtés elvi minimumát!**

Ehhez elegendő a következő adathalmazt elemezni:

1. A felmelegítendő ("*hideg*") áramok száma: N

1. fejezet: Energia-targeting és a pinch alapjai

2. A lehűtendő ("meleg") áramok száma: M



1.1. ábra: Hőcserélő hálózat folyamatábrája

3. A hideg áramok adatai ($i=1,2,\dots,N$):

- t_i^o : kiindulási hőmérséklet
- t_i^* : célhőmérséklet
- c_i : hőkapacitás-áram

4. A meleg áramok adatai ($j=1,2,\dots,M$):

- T_j^o : kiindulási hőmérséklet
- T_j^* : célhőmérséklet
- C_j : hőkapacitás-áram

A *hőkapacitás-áram*, vagy röviden "*hőkapacitás*" az áram [mennyiség/idő] és a fajhő [energia/(mennyiség*hőfok)] szorzata, vagyis dimenziója [energia/(hőfok*idő)]. Ezek az adatok meghatározzák a kívánt hőforgalom nagyságát és áramonkénti eloszlását,

valamint a spontán hőátadás lehetőségét az egyes áramok között az adott hőmérsékleteken.

Azonnal kiszámítható a nulla energiavisszanyeréshez tartozó fűtés és hűtés:

$$F_0 = \sum_i c_i (t_i^* - t_i^0)$$

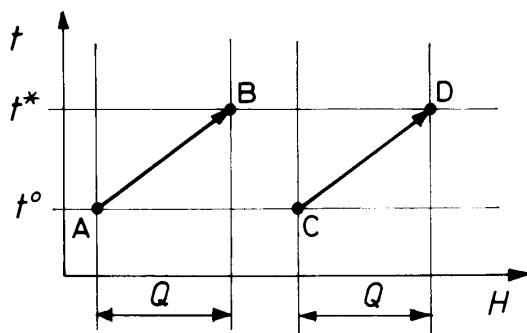
$$H_0 = \sum_j C_j (T_j^0 - T_j^*)$$

Alkalmos hőfokviszonyok esetén a maximális energiavisszanyerés a két érték minimuma lenne. Ha $F_0 < H_0$, akkor a maximális visszanyerés F_0 , a minimális hűtés $H_0 - F_0$, fűtésre pedig nem lenne szükség. Ellenkező esetben a fűtés és a hűtés felcserélésével szimmetrikus tükörképet kapunk.

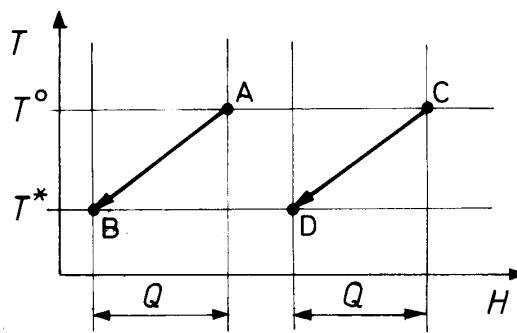
A maximális energiavisszanyerés azért kevesebb ennél, mert az adott hőfokok korlátozzák a spontán energiaátadást a meleg és a hideg áramok között. Ezeket a korlátokat veszi figyelembe a pinch technika az aktuális maximum meghatározásához.

1.2. Összetett vonalak szerkesztése

Az egyes hideg áramok fűtési igényeit a pinch technika céljaira legegyszerűbben t - H diagramon ábrázolhatjuk (H : entalpia). Ilyen diagramot mutat a **2. ábra**. A t -tengelyen az előírt t^0 kiindulási és t^* célhőmérsékletet tüntettük fel. A H -tengelyen Q -val jelöltük az áram fűtési igényét. A vizsgált hideg áram összetartozó hőmérséklet- és entalpiaváltozását egy irányított vonallal jelölhetjük, jelen esetben ez éppen az A és a B pontokat összekötő vonal. Mivel az entalpia nullpontja definíció kérdése, illetve tetszőleges hőmérséklettől számíthatjuk a melegedés által okozott entalpiaváltozást, az A (vagy a B) pontot tetszőleges entalpiaérték fölé tehetjük. Úgyis csak az A és B közti entalpiaváltozás (vagyis Q) az, amit ábrázolni kívánunk.



1.2. ábra



1.3. ábra

1. fejezet: Energia-targeting és a pinch alapjai

Az AB vonal egyenes, mert a hőkapacitás konstans (független a hőmérséklettől). A vonal meredeksége a hőkapacitás reciprokával arányos. Más szóval: ha a hőfokot tekintjük független változónak és az entalpiát függőnek, akkor a meredekség arányos a kapacitással. Általános esetben a fajhő, és így a kapacitás nem konstans, ekkor az áramot görbe vonal jellemzi. Ennek tárgyalásától azonban itt eltekinthetünk.

Mivel csak a Q szakasz hossza az érdekes, ugyanazt az áramot különböző kezdőpontokból felmérhetjük, csak a hőfokoknak és a lefedett szakasz Q hosszának kell megegyezőnek lenniük. A **2. ábrán** a CD vonal ugyanazt az áramot, vagy pedig ugyanolyan adatokkal jellemzett áramot ábrázol, mint az AB vonal.

A meleg áramokat ugyanígy ábrázolhatjuk, csak a vonal irányítása ellenkező. A **3. ábrán** az AB és a CD vonalak ugyanazt a meleg áramot ábrázolják.

Az összes (N) hideg áram együttes fűtési igényét egy *összetett áramot jellemző vonallal*, az ún. **összetett vonallal** (*composite curve*) ábrázolhatjuk a hőfokok függvényében. Az összetett hideg áram vonalának meredeksége minden hőfokon megegyezik az adott hőfokon jelen levő hideg áramok hőkapacitásainak összegével.

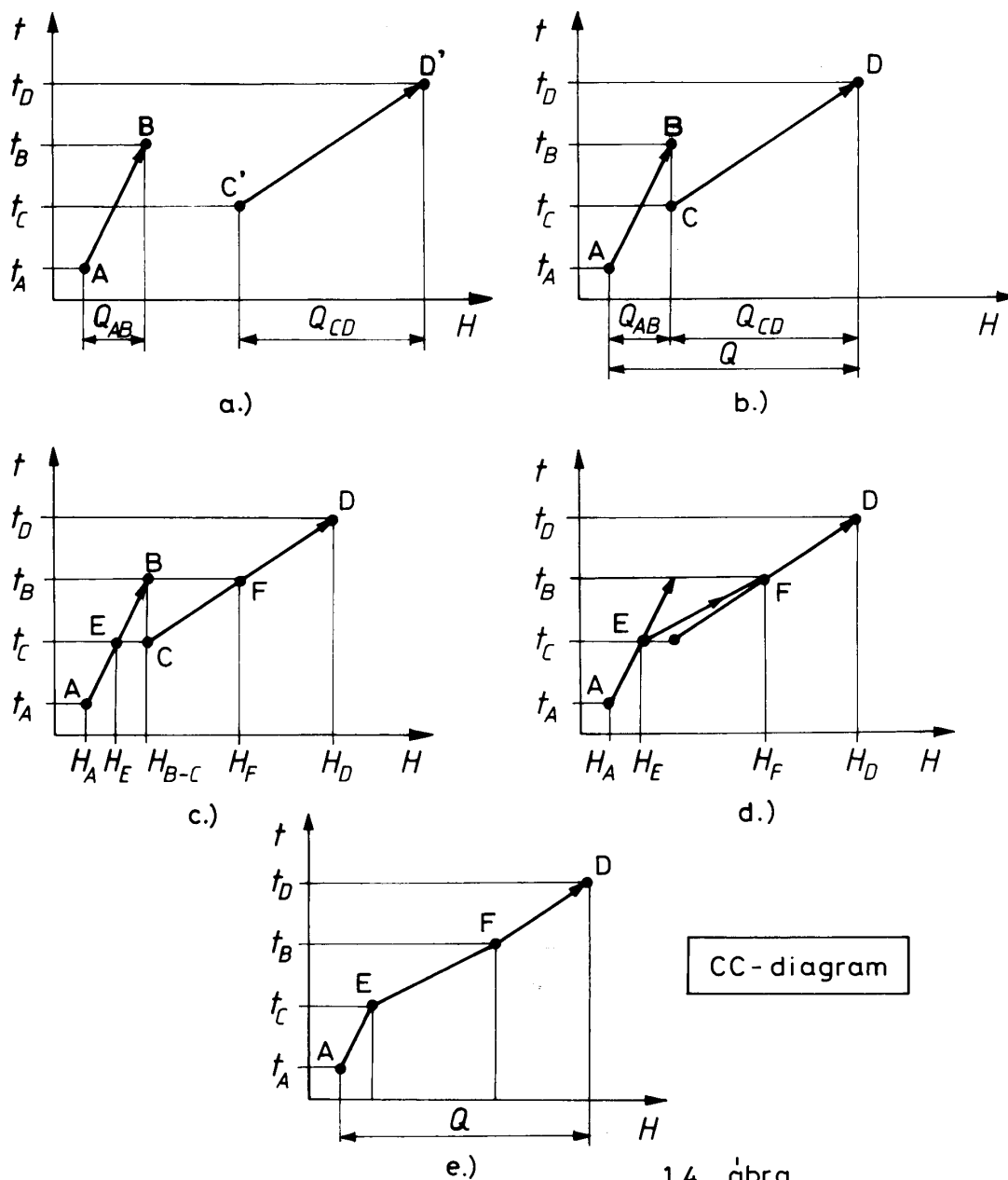
Az összetett vonal szerkesztésének lépéseit a **4. ábrán** követhetjük nyomon. A **4/a ábrán** két hideg áramot mutatunk. Ezek az AB és a $C'D'$ vonalakkal jellemzett áramok. Az áramok a t_c t_b hőfokintervallumban átfednek. Ez alatt az összetett áram meredeksége szükségszerűen megegyezik az AB áram meredekségével, fölötte pedig a CD áram meredekségével. Az átfedő hőfokintervallumban kell új meredekségű vonalat szerkeszteni.

Első lépésként a két áramot az entalpiatengely mentén úgy toljuk el, hogy a lefedett (Q -) szakaszok egymás mellé kerüljenek. Ezt mutatja a **4/b ábra**. Ez az eltolás megtehető, mert csak az egyes szakaszok hossza lényeges. Az eltolás után kialakul az összetett áram közös, megszakítatlan Q vetülete ($H_A - H_D$) aminek hossza természetesen azonos az egyes áramok Q -hosszainak összegével. Így az összetett áram kezdőpontja a H_A kezdőentalpia és a legkisebb, t_A hőmérséklet koordinátapárral jellemzett A pont, végpontja pedig a H_D végentalpia és a legmagasabb, t_D hőmérséklet koordinátapárral jellemzett D pont. Az összetett áram vonala A -ból D -be mutat, de nem egyenes, hanem tört vonal mentén.

Második lépésként kijelöljük azokat a hőmérséklet- és entalpia-intervallumokat, melyekhez a törtvonal egyenes szakaszai tartoznak. Ezeket a rögzített hőfokok jelölik ki. Így kapjuk a **4/c ábrán** az E és az F pontokat, és a megfelelő H_E , H_{B-C} , és H_F vetületeket.

A következő lépésben intervallumonként megszerkesztjük megfelelő meredekségű vonalat. Ez nagyon egyszerű: adott a lefedett hossz (Q), illetve a megfelelő H -szakasz, és adott a két hőmérséklet. A kapott téglalapba húzott átló lehet csak a kívánt meredekségű egyenes vonal.

A $t_A t_c$ alsó intervallumban ez az AE vonal, ami az eredeti AB vonal mentén fut, a $t_b t_D$ felső intervallumban pedig az FD vonal, ami az eredeti CA vonal mentén fut. Az átfedő



1.4. ábra

1.4. ábra: Összetett hővonalak szerkesztése

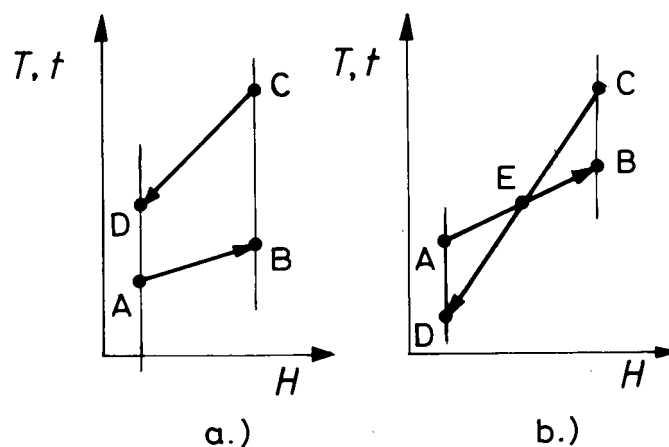
t_C – t_B intervallumban az EF átlót húzzuk meg (4/d ábra). Ennek meredeksége szükségszerűen megfelel a két hőkapacitás összegének, különben a két hőfok között nem fedné le a $H_E H_F$ entalpiaszakaszt, azaz nem teljesülne az energiamérleg.

Végül az egyes külön áramok eredeti vonalait elhagyva kapjuk az összetett áram vonalát, ami a 4/e ábrán az $AEFD$ vonal.

Ugyanígy szerkeszthető meg a meleg áramok összetett vonala is.

1.3. CC-diagram és pinch

Egy-egy meleg és hideg áram vagy áram-szakasz közti hőcserét, azaz a megfelelő áramok vagy áram-szakaszok együttes hőfokváltozását is t - H diagramon ábrázolhatjuk. Ellenáramú hőcserét ábrázol az **5/a ábra** két vonala. A lefedett H -szakaszok (így azok Q hossza is) azonos, a két vonalat egymás alá (fölé) rajzoljuk. Az azonos lefedett H -szakasz biztosítja a Q hőteljesítményű hőcsere energiamérlegét. A második főtételt az biztosítja, hogy a meleg áram minden ponton melegebb a hideg áramnál.



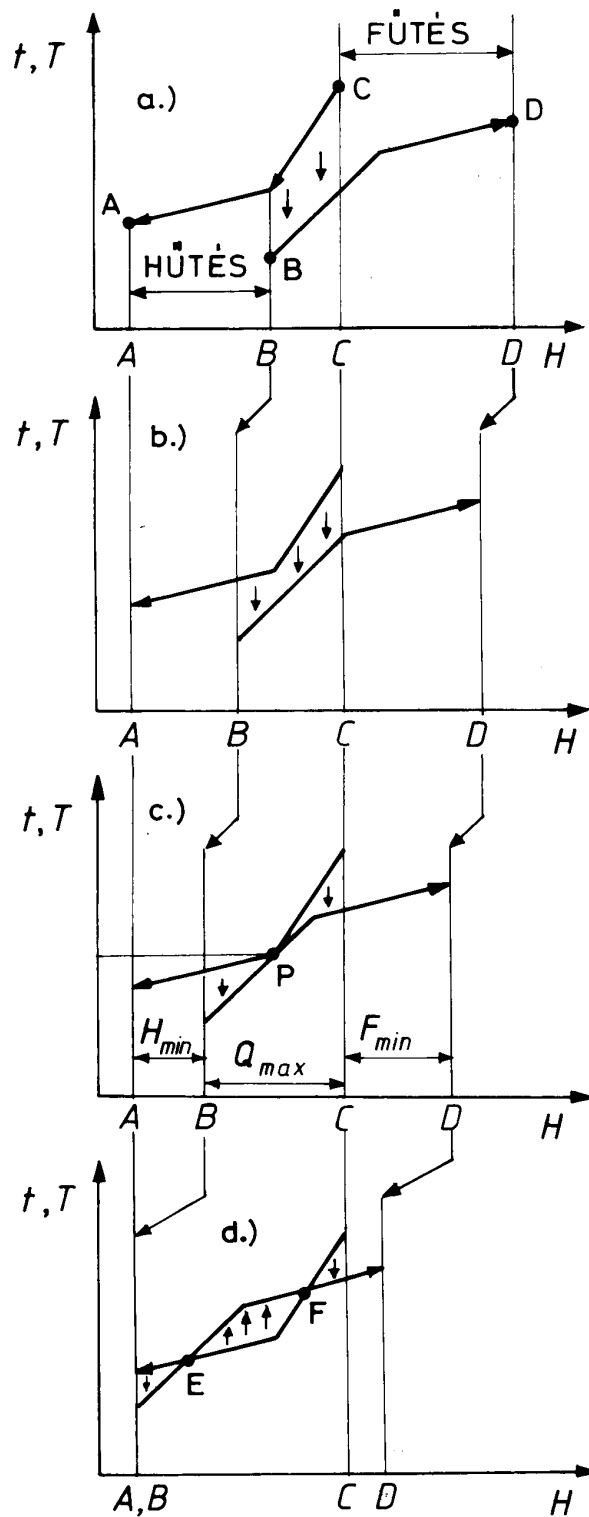
1.5. ábra

Az **5/b ábra** irreális hőcserét mutat. A hőmérték teljesül, de az E ponttól balra a meleg áram hidegebb a hideg áramnál, így a hőátadás a kívánt irányban nem valósítható meg.

Mivel az összetett vonalakat az egyes hőfokokhoz szerkesztettük, ugyanez az elv alkalmazható a meleg és a hideg összetett vonalak egymáshoz illesztésére is. A megfelelően átfedő szakaszok energia-visszanyerésre alkalmas szakaszokat jelentenek.

A **6/a ábrán** a CA meleg és BD hideg összetett áramok H -átfedő BC szakasza felel meg az energia-visszanyerésnek. A "fedetlen" CD szakasz a hideg áramok maradék fűtési igényének felel meg, szaggatott vonallal be is rajzoltuk a megfelelő fűtőközeg vonalát. Az ugyancsak pár nélküli BA szakasz viszont a meleg áramok maradék hűtési igényének felel meg, és ugyancsak szaggatott vonallal rajzoltuk be az alkalmazott hűtőközeg vonalát. Az ilyen diagramot (a szaggatott vonalakkal vagy anélkül) az *összetett vonalak diagramjának*, eredeti nevén *Composite Curve (CC) -diagramnak* nevezzük.

Ha a két összetett vonalat közelebb toljuk egymáshoz (amire lehetőségünk van, mert az egyes meleg vagy hideg szakaszok Q hossza nem változik), akkor az átfedő szakasz hossza megnő, a maradék szakaszok hossza megrövidül (**6/b ábra**). Ez az energia-visszanyerés növekedésének és a szükséges fűtés és hűtés csökkenésének felel meg.



1.6. ábra

1. fejezet: Energia-targeting és a pinch alapjai

Hogy milyen hőcserélő rendszer képes ezt megvalósítani, arról még nincs tudomásunk, de a kívánt energia-visszanyerés biztosan megvalósítható, mert a feltételek teljesülnek.

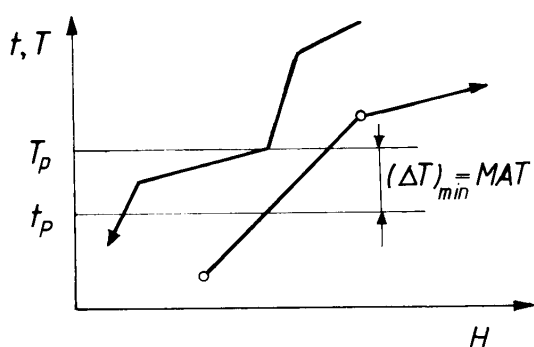
Ha a két összetett vonalat még tovább toljuk egymás felé, akkor egy idő után azok metszik egymást, ahogy az a **6/d ábrán** látható. Az *EF* szakaszon a meleg áramok a hideg áramok alá kerülnek, vagyis az így kijelölt energia-visszanyerés irreális, megvalósíthatatlan.

Az energia-visszanyerés maximumát az a helyzet jelöli ki, melyben a két összetett áram éppen érinti, de nem metszi egymást. Ezt a helyzetet mutatja a **6/c ábra**. A *P* érintési pontot nevezzük **PINCH pontnak**, a megfelelő hőmérséklet a *pinch hőfok*. Az ábráról leolvasható az energiavisszanyerés elméleti maximuma (Q_{\max}), valamint a szükséges külső fűtés és hűtés elméleti minimuma (F_{\min} és H_{\min}).

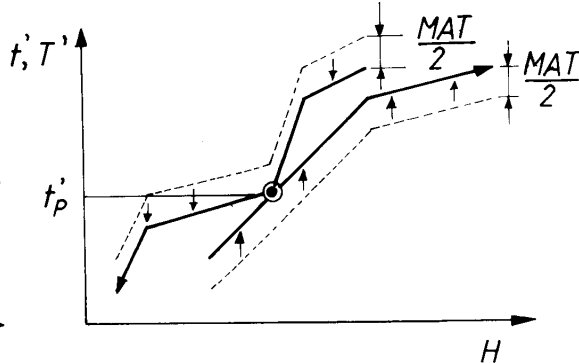
1.4. "Shifted" és "unshifted" CC-diagramok

A **6/c ábra** energia-visszanyerése is irreális, mert a hőközléshez pozitív hőfokkülönbség kell. A gyakorlatban nem alkalmazható tetszőlegesen kicsiny hajtóerő a tervezésnél, mert a megvalósított rendszerekben előre nem számítható ellenállások csökkentik a hőátadást. Ezért, és a II. fejezetben tárgyalandó egyéb okok miatt a gyakorlatban a tervezéshez előírnak egy rögzített, véges, minimális hőfokkülönbséget, melyet a továbbiakban MAT-tal (minimum approach temperature) jelölünk.

A pinch-helyzetű CC-diagramot ekkor a **7. ábra** mutatja. A pinch ebben az esetben egy pontpár, vagyis egy közös entalpia-értékhez tartozó hőfokpár. Ekkor beszélhetünk külön meleg és hideg pinch-hőmérsékletről. Ennek még jelentősége lesz a későbbiekben.



1.7. ábra



1.8. ábra

Részben technikai okok miatt, részben a következő alfejezetben tárgyalt GCC megszerkeszthetősége céljából szokás a szerkesztést úgy egyszerűsíteni, hogy a meleg és hideg áramok hőfokait MAT-tal közelítjük egymáshoz. Például a meleg áramok hőfokait a MAT felével csökkentjük, a hideg áramok hőfokait a MAT felével növeljük, azaz az áramokat a t -tengely mentén toljuk egymáshoz közelebb, a **8. ábra** szerint. Hangsúlyozzuk, hogy ez csak technikai módosítás, valódi áramok esetén az áramok tulajdonságait (pl. fajhő) az eredeti hőmérsékleten kell számítani. Az így kapott diagramot "eltolt", "összetolt", azaz *Shifted CC*-diagramnak, míg az eredetit "el nem tolt", "össze nem tolt", azaz *Unshifted CC*-diagramnak hívják. A *Shifted CC* esetén a pinch valódi összeérést jelent, mintha termodinamikai, elméleti szélsőértéket határoznánk meg.

1.5. Grand Composite Curve (GCC-diagram)

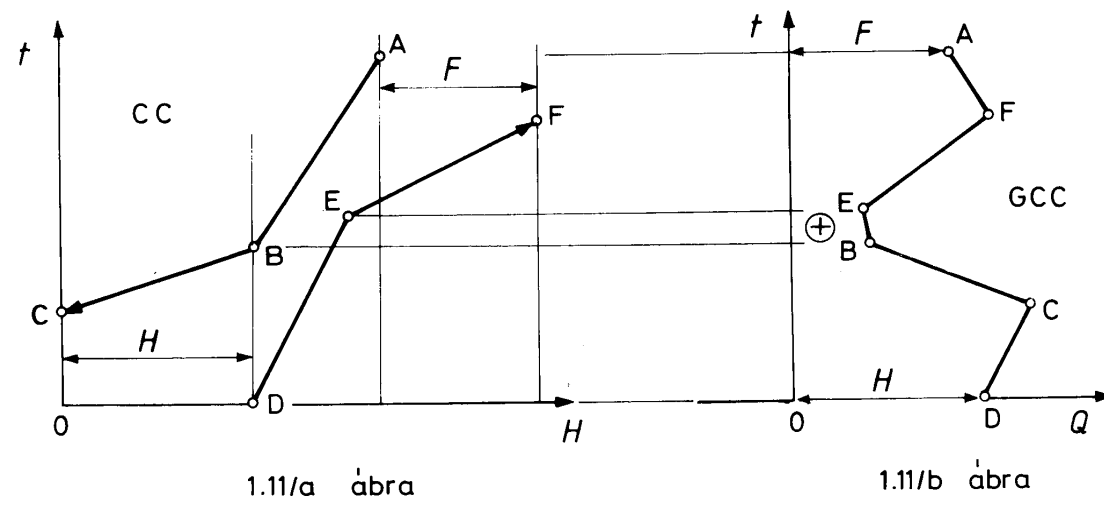
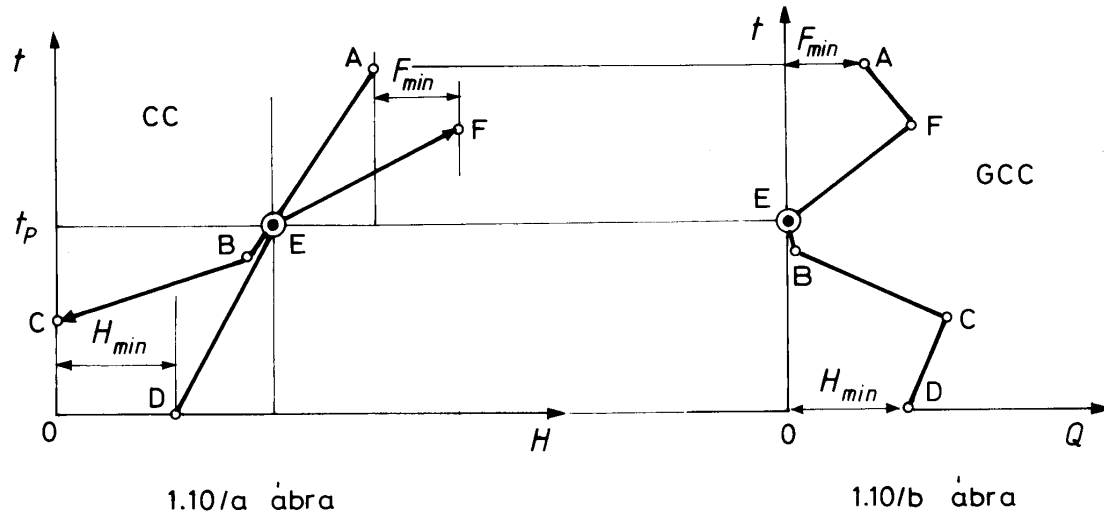
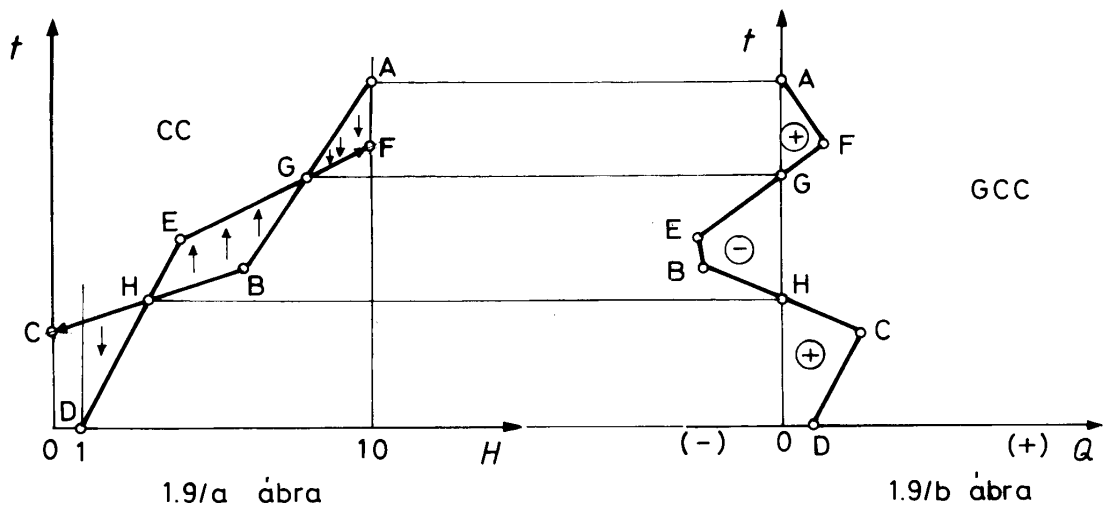
Részben a numerikus számítások magyarázatánál, de még inkább a pinch technika általánosabb alkalmazásainál nagy szolgálatot tesz a CC alapján értelmezhető és megszerkeszthető GCC, azaz *Grand Composite Curve*, mely kifejezés magyar megfelelője talán a "Fő hővonal" vagy egyszerűen csak "Fővonal" lehet.

A GCC egy olyan t - Q diagram, mely egyenértékű a *Shifted CC*-vel, s belőle származtatható. Minden hőmérsékleten leolvassuk a hideg és a meleg összetett vonal adott pontjához tartozó entalpia-értéket, s ezek különbségét mérjük föl a Q -tengelyre. Úgy is felfoghatjuk, hogy minden hőmérsékleten kiszámítjuk az aktuális meleg \rightarrow hideg hőforgalmat.

Hogy megkönnyítsük a következő alfejezetben tárgyalt hőkaszkád-számítás megértését, szemléltetésül egy olyan *Shifted CC*-ből indulunk ki, melynek magas hőmérsékletű végpontjait azonos entalpiaponthoz illesztettük. Mondjuk, azért tettük ezt, mert az összegzett hőkínálat nagyobb az összegzett igénynél, s így szerencsés esetben nem kell külső fűtést alkalmazni. A jelen esetben, amit a **9/a. ábra** mutat, nem vagyunk ilyen szerencsések, a külső fűtés mellőzése irreális. A **9/b ábra** mutatja a megfelelő GCC-t.

Mivel a jobboldalakat illesztettük, a GCC-n az A pont a $Q=0$ helyen van. Az F pontban Q pozitív, ami reális hőcserét jelent. A két CC a G pontban metszi egymást, ennek megfelelően a G pont is a nulla hőcseréhez tartozik. G -től a másik metszéspontig, H -ig, a meleg áramok összetett vonala a hideg alatt fut, ennek megfelelően Q negatív. Ez a negativitás az, ami irreális. A negatív hőátadást csak úgy értelmezhetjük, hogy a szokásossal ellenkező irányú hőátadás történik. H -tól lefelé a hőátadás ismét pozitív. Az (irreális) nulla fűtéshez tartozó hűtést az energiamérleg egyértelműen meghatározza. Ezt a CC-diagramon a D és a H pontok entalpiáinak különbségeként, a GCC-diagramon viszont egyszerűen a D ponthoz tartozó Q értéként olvashatjuk le.

1. fejezet: Energia-targeting és a pinch alapjai



A **11/a és 11/b ábrák** a reális energia-visszanyerést mutatják a *Shifted CC* és a hozzátartozó GCC diagramon. A GCC alakja nem változott, az egész vonal annyival tolódott jobbra, amennyivel a két összetett vonalat széttoltuk. Az aktuális fűtés és az aktuális hűtés az *A* és a *D* pontoknál olvasható le, mint a *t*-tengelytől mért távolságként.

A **10/a és 10/b ábrák** mutatják a maximális energia-visszanyerés, azaz a minimális külső energia-forgalom esetét. A CC-beli *pinch* pontnak a GCC esetében a *t*-tengely érintése felel meg. Az érintési pont itt az *E* pont. Ha az összetett görbét közelebb, azaz a GCC-t balra tolnánk, akkor megjelenne a negatív hőközlés, ami irreális. Ha az összetett görbét széttolnánk, azaz a GCC-t jobbra tolnánk, akkor fölös fűtést és hűtést kapnánk.

Vegyük észre, hogy a hőmérleg következtében a fölös fűtés mennyisége mindig azonos a fölös hűtés mennyiségével!

1.6. Hőkaszkád-számítás

A hőkaszkád számítás a pinch pont és a minimális külső hőforgalom numerikus meghatározása. Részletes magyarázat helyett konkrét példán mutatjuk be a hőkaszkád számítását.

1. Táblázat: Mintapélda adatai

Áram	Kapacitás kW/°C	Belépő hőfok °C	Kilépő hőfok °C
A (meleg)	2,0	150	60
B (meleg)	8,0	90	60
C (hideg)	2,5	20	125
D (hideg)	3,0	25	100
MAT =			20

Első lépésként *Shifted* adatokat számítunk, vagyis az áramok hőfokait MAT-tal közelítjük egymáshoz. Ha fele-fele arányban tesszük ezt a meleg és a hideg áramokkal, akkor a meleg áramok hőfokait 10 fokkal csökkentjük, a hidegeket ugyanannyival növeljük. Így kapjuk a **2. Táblázat** adatait.

Ezután meghatározzuk a jellemző hőfokokat (vagyis a CC és a GCC töréspontjainak hőfokait). Ezek csökkenő sorrendben: 140, 135, 110, 80, 50, 35, 30. Az intervallumok határpontjainak ismeretében meghatározhatjuk az egyes hőfok-intervallumokban jelenlevő áramokat, és kiszámíthatjuk az intervallum hőkínálatát. Ezt a **12. ábra** vázlata segítheti. A vázlaton berajzoltuk az áramok által befutott hőfoktartományokat. Azonnal látható, hogy az egyes intervallumokban mely áramok vannak jelen.

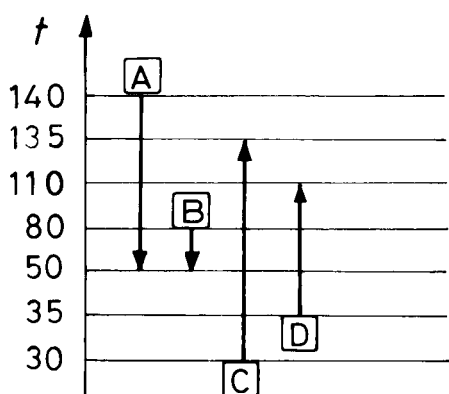
Az összegzett kínálatot úgy számítjuk, hogy (1) összegezzük az áramok kapacitásait (a meleg áramok kapacitásait pozitívnak, a hidegeket negatívnak véve), és (2) az így kapott algebrai összeget megszorozzuk az intervallum hosszával. Ekkor a **13. ábrának** megfelelő számokat kapjuk.

Az összegzés jogosságát a **14. ábra** magyarázza. Ez egy ún. *hőtartalom diagram*, melynek egyik tengelyén az áramok hőmérséklete szerepel, a másik tengely mentén pedig az áramok hőkapacitását ábrázoljuk intervallum-skálán. Az egyes áramokat olyan idomok (konstans hőkapacitás esetén téglalapok) ábrázolják, melyek szélessége arányos

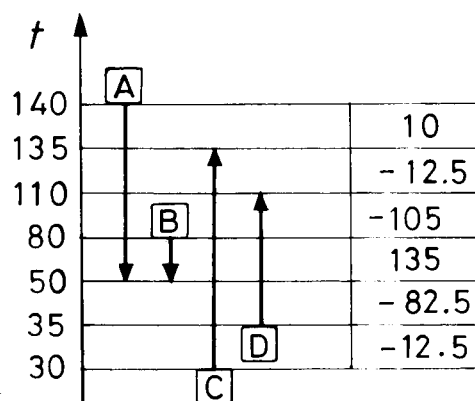
a hőkapacitással. Ennek következtében az idomok területe éppen a kívánt áram hőkinálatát vagy fűtési igényét képviseli. Bármely meleg áram terület hozzárendelhető

1. Táblázat: Mintapélda adatai "shifting" után

Áram	Kapacitás kW/°C	Belépő hőfok °C	Kilépő hőfok °C
A (meleg)	2,0	140	50
B (meleg)	8,0	80	50
C (hideg)	2,5	30	135
D (hideg)	3,0	35	110



1.12 ábra



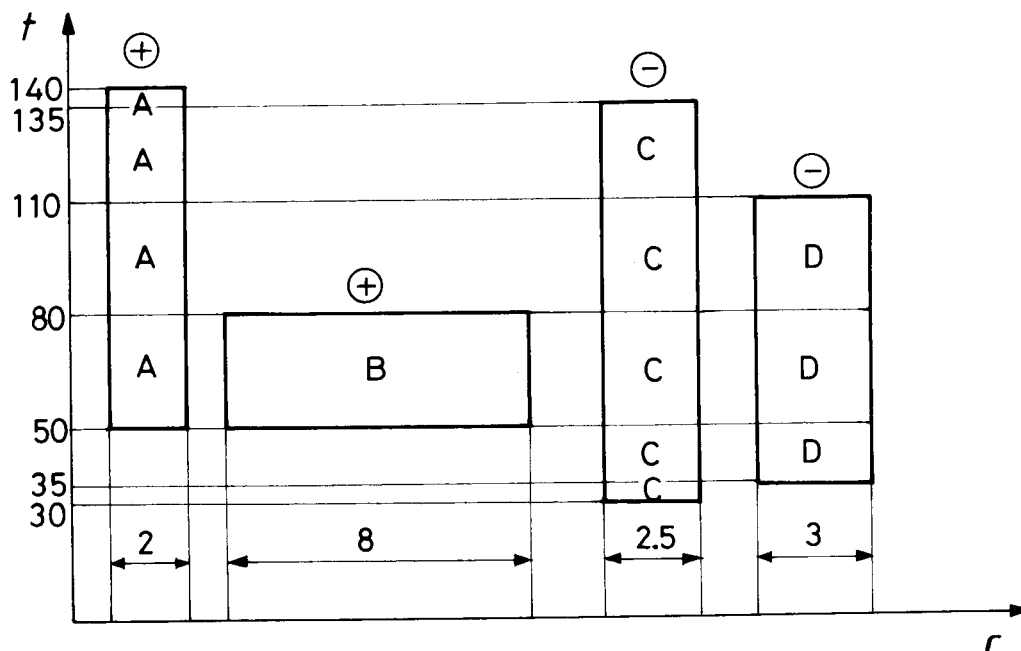
1.13 ábra

ugyanolyan nagyságú hideg áram területhez, és ha a hideg áram hőfokai kisebbek a meleg áram megfelelő hőfokainál, akkor ez az összerendelés egy adott hőteljesítményű hőcserének felel meg.

Ha a hőtartalom diagramon a "Shifted" hőmérsékletek szerepelnek, akkor a hőcsere feltétele formálisan nem a pozitív, hanem a nemnegatív hőfokkülönbség. Az azonos "shifted" hőfokú meleg és hideg áram között éppen megvan a kívánt minimális hőfokkülönbség (MAT), így azok egymáshoz rendelhetők. Az azonos hőfok-intervallumban szereplő meleg és hideg áramok között minden hőfokon (minden végtelenül kicsiny intervallumban) teljesül ez a feltétel. Ezért az azonos intervallumba tartozó meleg és hideg áramok közti maximális hőcserét megkapjuk, ha a két idomot maximálisan fedésbe hozzuk. A le nem fedett meleg áram terület az intervallum fölös

1. fejezet: Energia-targeting és a pinch alapjai

(összegzett) hőkínálata. Ha a hideg áramból (hideg áramokból) marad le nem fedett terület, akkor az fűtési igény, avagy negatív hőkínálat.



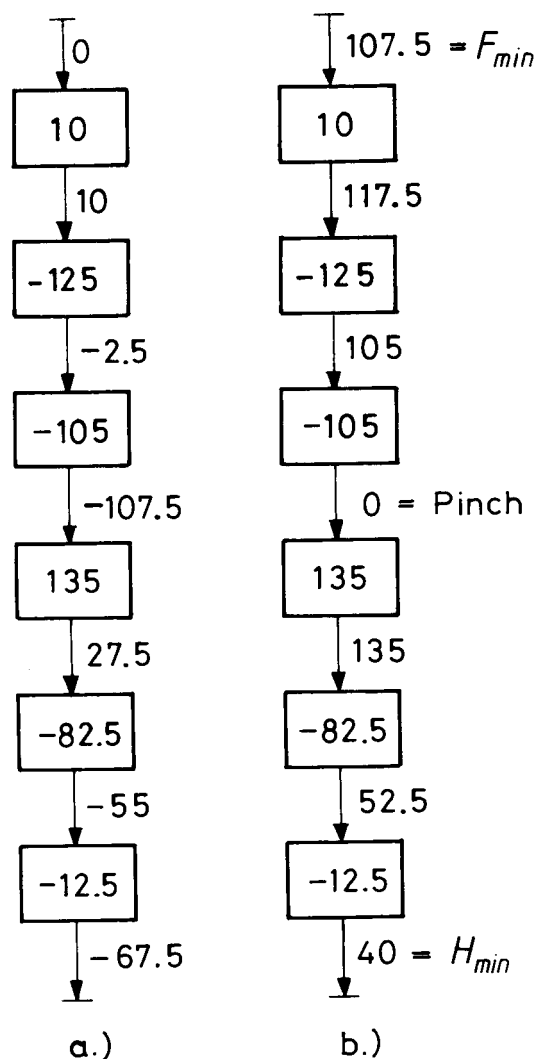
1.14. ábra

Ha az egyes intervallumok maximális energia-visszanyerése után maradó algebrai összegzett hőkínálatokat így meghatároztuk, akkor az GCC szerkesztésekor alkalmazott gondolatmenetet követve számíthatjuk a hőszkádót.

Első lépésként feltesszük, hogy nincs szükség külső fűtésre. Ez megfelel annak, hogy az összetett vonalak felső pontjait azonos entalpia-értékhez illesztettük, vagyis nulla Q értékhez illesztettük a GCC felső pontját (9/a és 9/b ábrák). Az egyes intervallumok maximális belső visszanyerését már kimerítettük. Most meghatározzuk az intervallumok közti maximális visszanyerést. Ez könnyű feladat, hiszen az intervallumok egymás alatt helyezkednek el. Nem kell mást tennünk, mint a felső szintről szintenkénti lépésekben "lecsorgatni" a főlös kínálatot. Ha a kínálat negatív, akkor negatív kínálatot "csorgatunk le", ami fordított irányú, irreális hőközlést jelent.

Ezt a számítási lépést, illetve ennek eredményét a 15/a. ábra mutatja. Az egyes intervallumokat dobozok jelképezik. A doboz belsejébe írtuk az intervallum összegzett (maradék) hőkínálatát. A legfelső (első) intervallum 10 kW értékű kínálata felhasználható bármely lejjebb eső intervallumban az igények fedezésére. A maximális visszanyerés kiszámításának érdekében azonban szintenként haladunk, hogy minden lehetőséget kihasználjunk. A 10 kW kínálatot felhasználja a második intervallum, sőt, a 10 kW még kevés is igényeinek kielégítéséhez. A második intervallum -12,5 kW negatív kínálatából így kisebb negatív kínálat, -2,5 kW marad. Formálisan ezt a "kínálatot" továbbítjuk a harmadik intervallumnak, és így tovább. Eredményül a 0, 10, -

2.5, -107.5, 27.5, -55, -67.5 kW intervallumközi hőátadásokat kapjuk. Ezek közül a legfelső 0 kW a fűtés hiánya, a legalsó -67,5 kW a nulla külső fűtéshez tartozó külső hűtés, ami szükségszerűen megegyezik a hőmérlegből számítható szükséges fűtés ellentettjével. Ez az egyezés a számítás ellenőrzéséül szolgálhat.



1.15. ábra

A kapott intervallumközi hőátadások azonosak a GCC megfelelő Q -értékeivel. Minden intervallumközi hőátadás a megfelelő hőmérséklethez tartozik, s ebből felrajzolható a feladat GCC-je.

A negatív hőátadások természetesen irreálisak. A GCC-t jobbra kell tolni, hogy a hőátadások nemnegatívak legyenek. Ezt numerikusan úgy érjük el, hogy a legfelső intervallum fölött nulla helyett véges pozitív fűtést alkalmazunk. De mekkorát?

Pontosan akkorát, amekkora a negativitás megszüntetéséhez szükséges. Bármekkora X nagyságú fűtőteljesítményt alkalmazunk a kaszkád tetején, az a kaszkádon

1. fejezet: Energia-targeting és a pinch alapjai

végigcsorogva az energia-megmaradás miatt az összes intervallumközi hőátadást ugyanazzal az X értékkel növeli meg. Ezért *a legkisebb algebrai értékű intervallumközi hőátadás határozza meg a szükséges külső fűtés nagyságát.*

Esetünkben a legkisebb érték a $-107,5$ kW, tehát a kaszkád tetején $107,5$ kW fűtést kell alkalmazni, hogy a negatív számok eltűnjenek. Az eredményt a **15/b. ábra** mutatja. A minimális fűtés $107,5$ kW, a minimális hűtés 40 kW. Természetesen ezek csak az összes szükséges fűtés és hűtés, melyek részeit különböző hőmérsékleteken alkalmazhatjuk. A szélső hőmérsékleteken alkalmazás volt viszont a legegyszerűbb módja a minimumok meghatározásának.

A minimális külső hőforgalmat mutató hőkaszkád egyik intervallumközi hőátadása nulla. Ez éppen a megfelelő GCC pinch pontja. esetünkben ez 80 °C, ami a *shifted* pinch hőmérséklet. A valódi (*unshifted*) pinch hőfokok: 90 °C a meleg áramokra és 70 °C a hideg áramokra.

1.7. A pinch-szabályok

Mind a hőkaszkád, mind a vele egyenértékű GCC azt mutatja, hogy a minimális fűtésű és hűtésű (azaz pinch helyzetű) hálózat, vagyis a maximális energia-visszanyerés akkor érhető el, ha a pinch hőmérsékleten a hőátadás nulla. A pinch helyzetről ennél több is mondható.

Maximális energia-visszanyeréshez az alábbi három szabályt, mint szükséges feltételt be kell tartani:

- 1. A pinch hőmérsékleten keresztül ne történjen hőátadás.**
- 2. A pinch fölött ne hűtsünk.**
- 3. A pinch alatt ne fűtsünk.**

Megjegyzés: Véges MAT esetén kettős pinch hőmérséklettel kell számolni. Az 1. szabály azt jelenti, hogy a meleg pinch hőfok feletti melegáram-szakasz és a hideg pinch hőfok alatti hidegáram-szakasz között ne tervezzünk hőátadást. A 2. szabály azt jelenti, hogy a meleg pinch hőfok feletti melegáram-szakaszokon ne alkalmazzunk külső hűtést. A 3. szabály azt jelenti, hogy a hideg pinch hőfok alatti hidegáram-szakaszokon ne alkalmazzunk külső fűtést.

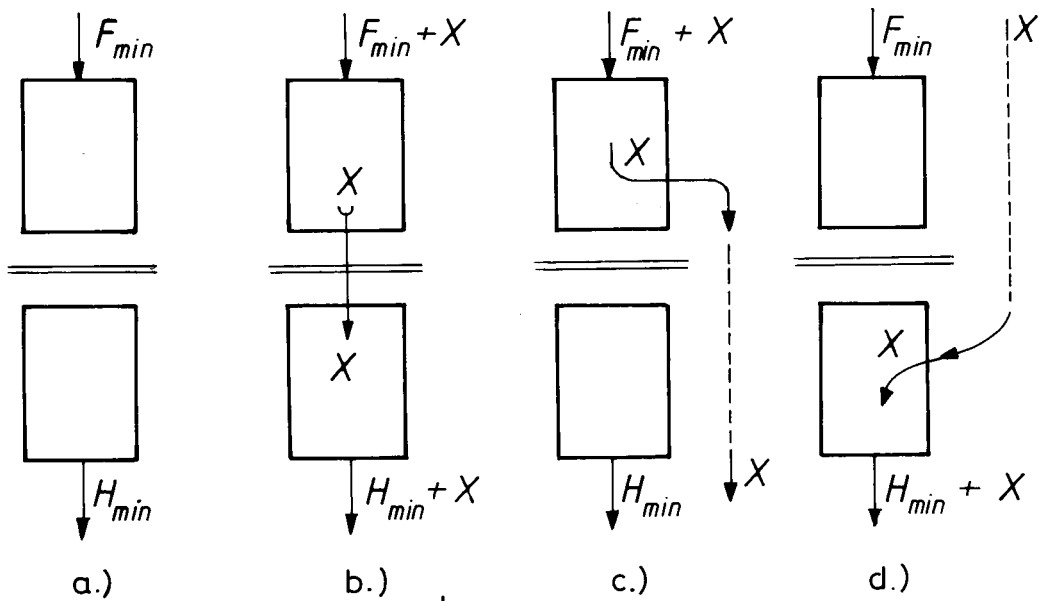
A szabályokat a **16. ábra** magyarázza.

A **16/a ábra** mutatja a helyesen kijelölt rendszert, ami megfelel a pinch helyzetű GCC-nek vagy kaszkádnak. A **16/b ábrán** azt mutatjuk, hogy ha a pinchen keresztül X

teljesítményű hűtadást valósítanánk meg, akkor (a hőmérség miatt) ugyanakkora, vagyis X nagyságú növekedést észlelnénk mind a fűtésnél, mind a hűtésnél. Ez az elrendezés a **11. ábra** diagramjainak felel meg.

A **16/c ábrán** feltételeztük, hogy a pinch fölött alkalmazunk X nagyságú külső hűtést. Megint csak az energiamérleg miatt valahol a hőelvonás fölött ugyanakkora fölös fűtést is alkalmaznunk kell. A **16/d ábrán** ennek tükörképét mutatjuk.

Figyelem! A pinch szabályok csak a maximális visszanyeréshez szükségesek. Ha nem ragaszkodunk maximális energia-visszanyeréshez, akkor a szabályok megsérthetők.



1.16. ábra