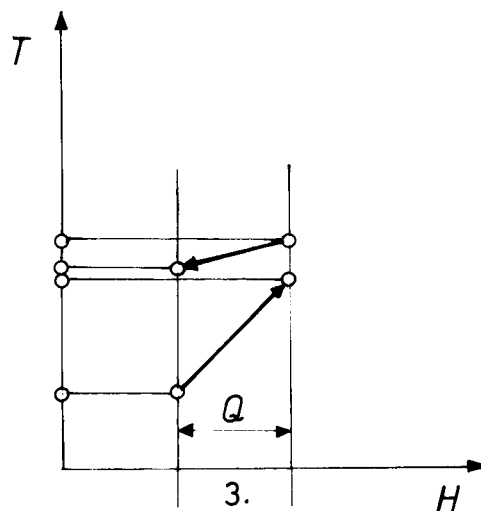


### 3. SZUPERTARGETING

#### 3.1. Minimális felület

Az **1. fejezetben** tárgyalt energia-targeting arra való, hogy a maximális energia-visszanyerést, és az ahhoz tartozó minimális energia-költséget előre meghatározzuk. Előre, vagyis még a HH szintetizálása előtt. Természetesen minden ilyen minimális energia-költség az önkényesen felvett MAT paraméter függvénye.

A HH tervezésénél a gazdasági cél az összköltség minimalizálása. Ezért jó lenne előre ismerni az energiához hasonlóan a beruházási költségek minimumát is. A beruházási költség minimuma helyett egyszerűbb a felhasznált összes hőátadó felület minimumát meghatározni. Ennek alapja az előző fejezetben tárgyalt vertikális hőközlés.



3.1. ábra

Az **1. ábra** egyetlen csatolást mutat  $T$ - $H$  diagramon. Mivel mind a négy hőmérséklet ismert, azokból számítható az átlagos  $\Delta$  hajtóerő. A  $H$ -tengelyre eső vetület megadja a  $Q$  hőteljesítményt. Ha még a (becsült)  $k$  hőátbocsátási tényező is ismert, akkor a szükséges felület azonnal számítható:

$$A = \frac{Q}{k\Delta}$$

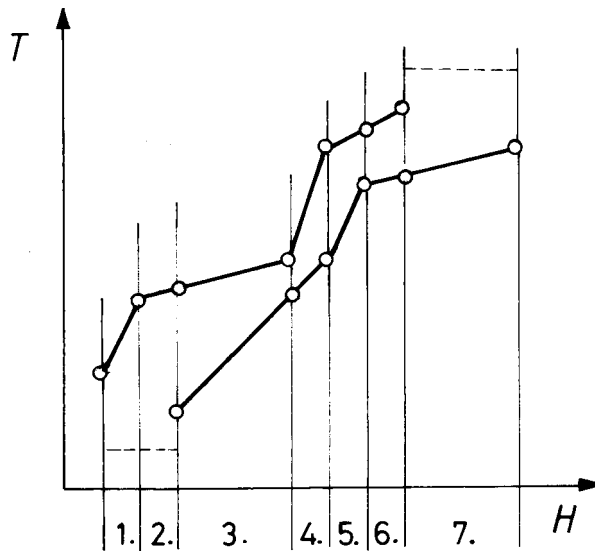
Ha több, azonos négy hőfokkal rendelkező hőcserélő  $Q_i$  teljesítményeinek összege éppen

$$Q = \sum_i Q_i ,$$

és ráadásul azonosak a (becsült)  $k$  hőátadási tényezők is, akkor az összes felület így számítható:

$$A = \sum_i A_i = \sum_i \frac{Q_i}{k\Delta} = \frac{1}{k\Delta} \sum_i Q_i = \frac{Q}{k\Delta} ,$$

vagyis ugyanúgy, mintha egyetlen csatolás lenne. Ebben az esetben az **1. ábra** úgy is tekinthető, mint az egyes szereplő áramok CC diagramja.



3.2. ábra

Tekintsünk most egy teljes CC-diagramot (*unshifted*), például a **2. ábrát!** Feltételezzük, hogy az összes megtervezendő csatolásra azonos a becsült  $k$  hőátadási tényező. Az ábra szerint az összetett görbék jellemző hőmérsékleteinél felosztottuk a H-tengely Q-szakaszokra. Minimális felületet keresünk, amiről tudjuk, hogy a vertikális hőközléshez tartozik. Vertikális hőközlés esetén a hőközlés az egyes szakaszokon belül történik. Az egyes  $Q_j$  szakaszok viszont olyan kisebb CC diagramok, melyekre a fentiek szerint ki tudjuk számítani a minimális felületet.

Minden egyes  $Q_j$  szakaszhoz ismert négy hőmérséklet, melyekből meghatározható a hozzá tartozó  $\Delta_j$  hajtóerő. Ennek alapján az összes felület minimuma:

$$A_{\min} = \sum_j A_j = \frac{1}{k} \sum_j \frac{Q_j}{\Delta_j}$$

Valójában persze a HH aligha lesz teljesen vertikális hőközlésű. Ennek ellenére a fenti  $A$  érték jó becslést ad a végső (optimális) felületre.

### 3. fejezet: Szupertargeting

A fentínél pontosabb becslés is adható, ha figyelembe vesszük az egyes áramok eltérő hőátadó képességeit. A **2.1 alfejezetben** vázolt modell szerint az egyes  $i$  áramok becsült, és a fal, valamint a lerakódás ellenállásával korrigált  $\alpha_i$  hőátadási tényezői felhasználásával az  $i$  és  $k$  áramok csatolásához tartozó  $k_{i,j}$  átbecsítési tényező becslése:

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

Ezzel a minimális felület becslése:

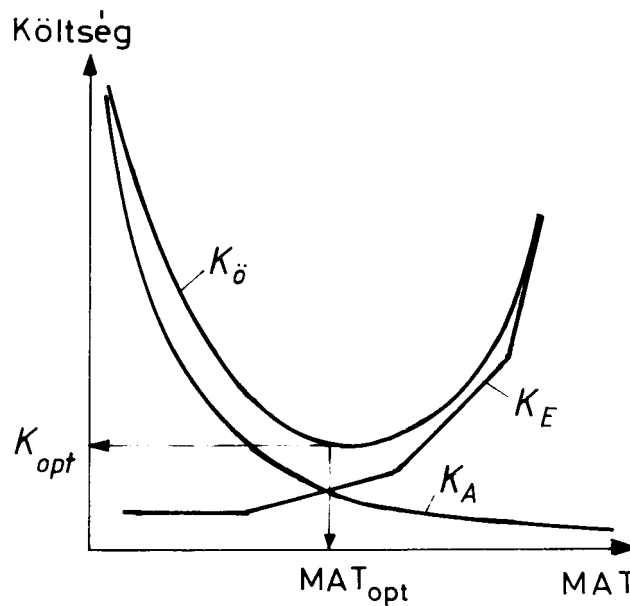
$$A_{\min} = \sum_j \left( \frac{1}{\Delta_j} \sum_i \frac{Q_i}{\alpha_i} \right)$$

Ez utóbbi képletet első publikálásának helyéről BATH-formulaként emlegetjük.

### 3.2. Összköltség és szupertargeting

A minimális felület ismeretében becsülhető a minimális beruházási költség is. Bár ez utóbbi függvénye a felületek eloszlásának is, valamilyen értelmes becslés mindig végezhető.

Mindezek a becslések önkényesen felvett MAT-hoz tartoznak. Gazdasági optimalizáláshoz különböző MAT-értékek mellett kell kiszámítani a várható költségeket. A MAT változtatásával a **3. ábra** szerinti függvényeket kapjuk.  $K_E$  jelzi az energiafogyasztás éves költségének grafikonját,  $K_A$  a beépített hőátadó felület egy évre vetített költségeinek grafikonját. A  $K_\delta$  összköltség minimumánál találjuk az optimumot. Az energiaköltség nő, a beruházási költség csökken növekvő MAT mellett, az éves összköltségnek pedig minimuma van. Ez a minimum a HH tervezése nélkül is meghatározható, ezt nevezik (hagyományosan) *szupertargeting*nek.



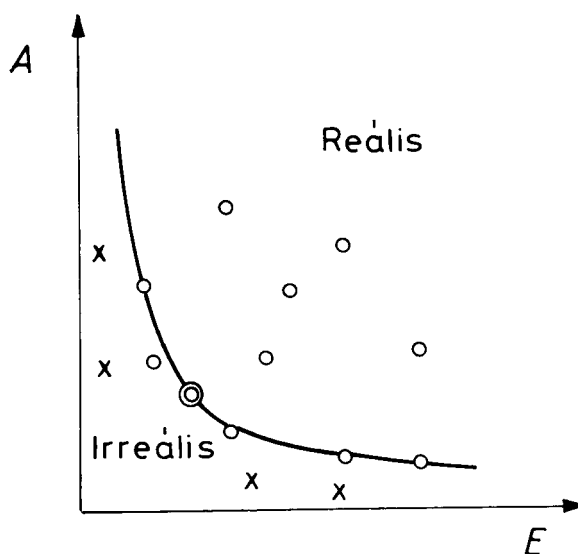
3.3. ábra

Az energia- és beruházási költségek avagy az energia-fogyasztás és a felhasznált felület összefüggése szemléltethető MAT nélkül is. A függőleges tengelyen  $E$  az energiafogyasztást, a függőleges tengelyen  $A$  a beépített hőátadó felületet jelzi. A **4. ábrán** a folytonos vonal alatti energia-felület párok nem megvalósíthatók. A valódi rendszerek a vonal fölött helyezkednek el, illetve a vonal mentén található a feltételesen optimális rendszerek. Bal oldalon (kis energia, nagy felület) a kicsiny MAT-hoz, jobb oldalon (nagy energia, kis felület) a nagyobb MAT-hoz tartozó optimumok pontjai találhatóak, és valahol közöttük az optimum.

### 3.3. Szupertargeting módosítás esetén

Az előző fejezetben meghatározott optimum nem használható fel közvetlenül annak becslésére, hogy működő üzemek módosításától milyen gazdasági eredmény várható, illetve, hogy milyen módosítást célszerű végrehajtani.

Tekintsük pl. az **5/a. ábrán**  $M$ -mel jelölt pontot, mely egy működő üzemet jellemez. Az adott energia-fogyasztáshoz tartozó minimális felületű rendszer pontja az  $A$ -val jelzett pont. A kettő között az az elvi különbség, hogy az  $A$  pont rendszerében csupa vertikális hőátadás van, míg az  $M$  pont rendszerében keresztvező csatlósok is szerepelnek.



3.4. ábra

Természetesen módosítás esetén az energia-fogyasztást is csökkenteni szeretnénk. Ehhez esetleg meghatározhatjuk a globális optimumot, ami a *B* pontban helyezkedik el (**5/b ábra**). Az *M-B* nyíl mutatja a képzelt módosítás irányát. A nyíl vetülete az *E*-tengelyre megadja a várható energia-megtakarítást, a vetület az *A*-tengelyre pedig a várható felület-megtakarítást.

Csakhogy a működő üzembe már korábban beépítettek annyi hőcserélő felületet, amennyi az *M* tervhez szükséges volt. Ezzel a felület-mennyiséggel még nagyobb energia-megtakarítás is elérhető, optimális esetben annyi, amennyit az **5/c ábrán** a módosítást jelző nyíl vetülete az *E*-tengelyre. Ehhez a megtakarításhoz nincs szükség új felületekre, vagyis **a beruházási költség és vele együtt a megtérülési idő nulla**.

Vagyis nem a globális optimumhoz viszonyítunk, hanem az adott, már beépített felület-mennyiséghez, és így a várható megtakarítás nagyobb, mint ami a globális optimum alapján várható lenne.

Sajnos a fenti célkitűzés a gyakorlatban nem teljesíthető. Ugyanis a beépített felületek konkrét geometriájú hőcserélőkhöz tartoznak, és nem csoportosíthatók át tetszés szerint. Hacsak nem kívánjuk kicserélni az egész hőcserélő rendszert vagy annak nagy részét (és általában nem akarjuk, mert az túl drága mulatság lenne), a beépített felületek adott alakja megszabja az elérhető visszanyerési hatásfokot.

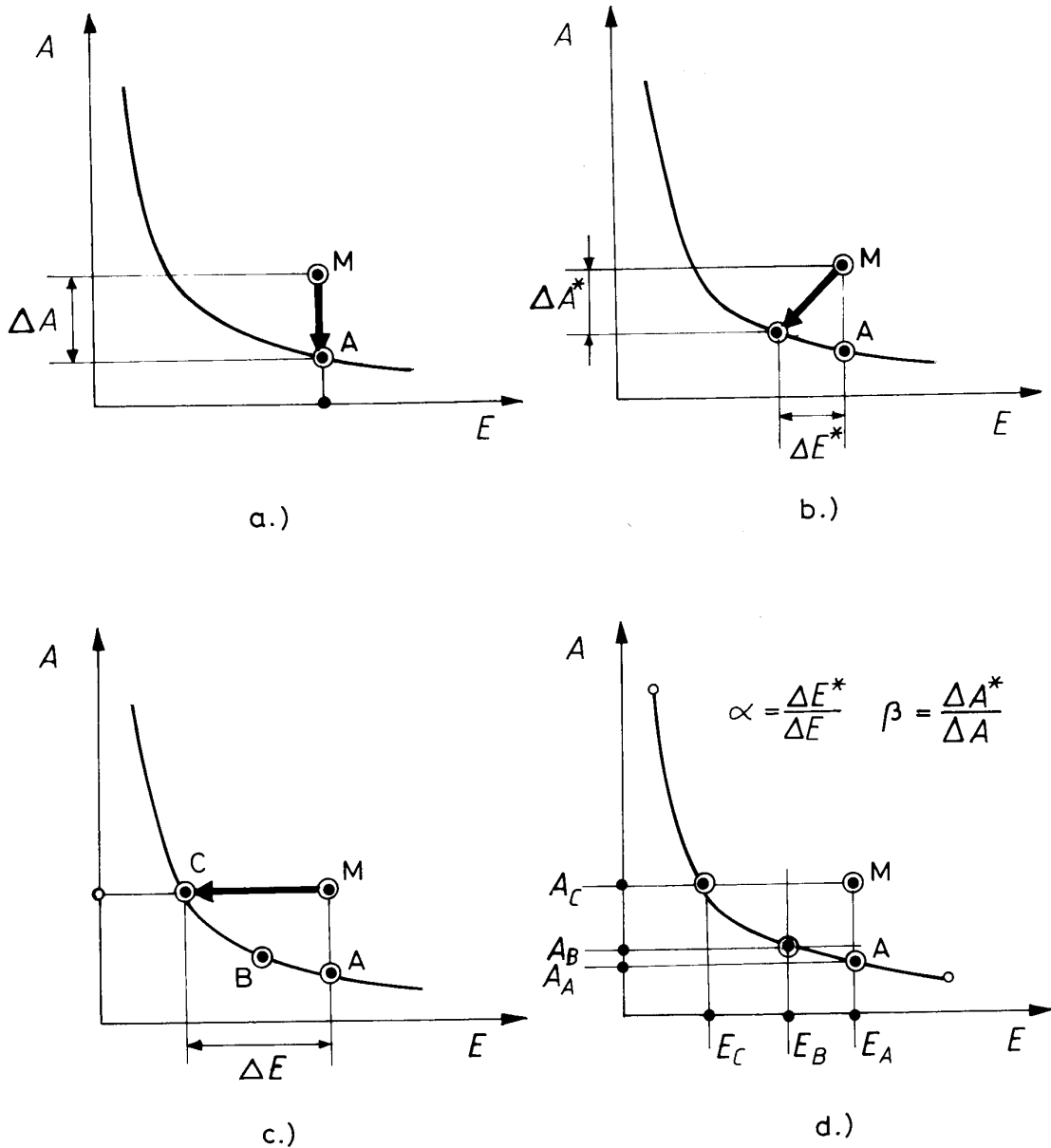
Az energiavisszanyerés hatásfokát az **5/d ábráról** leolvasható arányokkal jellemezhetjük. Egy lehetséges jellemző arány az

$$\alpha = \frac{E_C - E_B}{E_C - E_A},$$

míg egy másik a

$$\beta = \frac{A_A - A_B}{A_A - A_C}$$

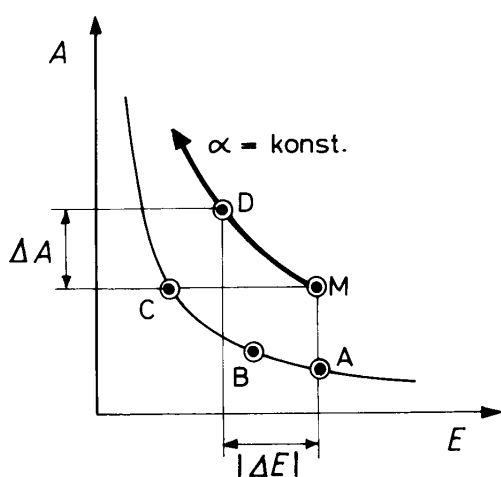
arány. Ezek az arányok az elérhető értékek az optimálishoz való viszonyát mutatják. Feltételezve, hogy a rendszeren csak kisebb változtatásokat hajtunk végre, ezek az arányok lényegesen nem módosulhatnak. Így ezek alapján megbecsülhető a valóban elérhető megtakarítás a beruházás függvényében. Ezt a **6. ábra** mutatja.



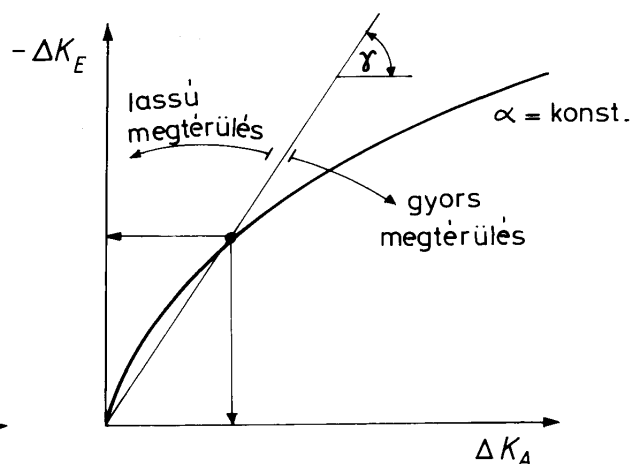
3.5. ábra

### 3. fejezet: Szupertargeting

A **6. ábrán** a konstans  $\alpha$  vagy konstans  $\beta$  vonalai mentén vagy közelében várhatók a közel optimális módosítások. Adott  $D$  terv esetén a beruházási költség  $K = A_D - A_M$ , míg az energia-megtakarítás várható értéke  $E = E_M - E_D$ . Ezeket a különbségeket kell felhasználni a gazdasági értékeléshez, pl. a **7. ábra** szerint. A **6. ábra** vízszintes tengelyén a  $DA$  többletberuházást, a függőleges tengelyen a hozzá tartozó  $DE$  energiaköltség-megtakarítást ábrázoljuk állandó  $a$  ill.  $b$  mentén. A  $g$  szöghöz tartozó meredekség arányos a kívánt megtérülési idővel. Az egyenstől jobbra  $A$  konstans  $\alpha$ -hoz vagy konstans  $\beta$ -hoz tartozó  $E$ - $K$  görbén a kívánt megtérülési idő egyenese kimetszi az optimális pontot.



3.6. ábra



3.7. ábra

### 3.4. Topológiai csapda és sokrétű pinch

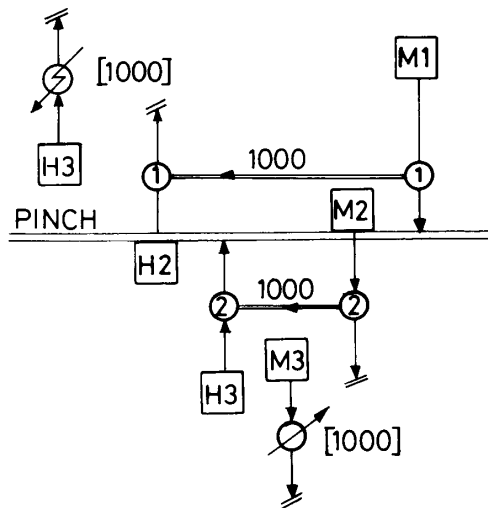
A topológiai csapda fogalmát jól érzékelteti az **1. Táblázatba** foglalt feladat megoldása. A feladatot úgy konstruálta meg az eredeti szerző (Gundersen és Grossmann, 1988), hogy minden meleg áram (Mx) és minden hideg áram (Hx) teljesítmény-igénye éppen 1000 kW, ezért a feladat könnyen áttekinthető. Az FG fűtőgőz és HV hűtővíz kapacitásadatai természetesen hiányoznak. Az igazán érdekes adatok az  $\alpha$  hőátadási tényezők oszlopában találhatóak.

Ha a hagyományos módon különböző MAT értékekhez hőcascád-számítást végzünk, meghatározzuk a pinch hőmérsékleteket, és a megfelelő képletekkel becsljük a szükséges felületeket, akkor kb. 20 °C-nál találjuk az optimumot. Ezzel a MAT-tal a **8. ábrán** látható rácsot kapjuk. Hasonló rácsot kapunk más MAT értékeknél is. A pinch tervezés szabályai szerint az M1 meleg áramot a H2 hideg árammal, az M2 meleg

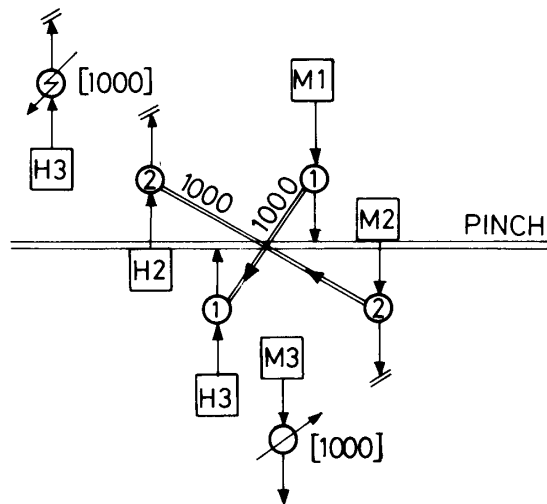
áramot a H1 hideg árammal kell csatolni. A maximális energia-visszanyerés mellett minimális egységyszámú hálózatot tervezünk ily módon. Ennek ellenére az így tervezett hálózat nem optimális.

**1. Táblázat: Topológiai csapda feladat**

áram jele	$T_{be}$ °C	$T_{ki}$ °C	$C$ kW/°C	$\alpha$ kW/°Cm <sup>2</sup>
M1	300	200	10	0.1
M2	200	190	100	1.0
M3	190	170	50	1.0
H1	160	180	50	0.1
H2	180	190	100	1.0
H3	190	230	25	1.0
FG	350	350	-	4.0
HV	030	050	-	2.0
Költség = 10 000,0 + $A^{0,8}$				



3.8. ábra



3.9. ábra

Mivel elég kevés áram szerepel a feladatban, számítógéppel egyenként végig lehet próbálni sok, elágaztatás nélküli, kevés csatolást tartalmazó kapcsolási rendet. A



### 3. fejezet: Szupertargeting

számítási eredmények azt mutatták, hogy az optimális és közel optimális kapcsolásokban az M1 meleg áramot a H1 hideg árammal, az M2 meleg áramot a H2 hideg árammal kell csatolni, a **9. ábra** szerint, vagyis a pinch keresztül.

Ehhez a kapcsolási rendhez a **8. ábra** kezdeti kapcsolásából ciklustöréssel és tologatással, általában fokozatos fejlesztéssel nem lehet eljutni. Ha egyszer rögzítettük az M1-H2 és M2-H1 párosítást, akkor abból kis lépésekkel nem jutunk el az M1-H1 és M2-H2 párosításhoz. Ezt nevezzük *topológiai csapdának*.

Feltűnő, hogy az optimális kapcsolásban a pinchet keresztező csatolások szerepelnek. Igaz ugyan, hogy ugyanakkora hőteljesítményű csatolást tervezünk a felső részrendszerből az alsóba, mint viszont, azaz a hatások eredője nulla. Mégis ellentmondásba jutunk a pinch elvével *adott MAT mellett*. Ennek nyilván az az oka, hogy nagyságrendi különbségek vannak az egyes áramok hőátadási tényezői között. *Ha egységes (pl. egységesen 0,5 értékű) hőátadási tényezőket veszünk a táblázatban adottak helyett, akkor a 8. ábra kapcsolása lesz az optimális.* Ez bizonyítja, hogy a jelenséget az átadási tényezők különbözősége okozza.

Nyilvánvaló, hogy a kisebb átadási tényezőjű áramhoz nagyobb optimális hőfokkülönbséget várhatunk, mint azokhoz, melyeknél könnyebb a hőátadás. Ennek szisztematikus figyelembe vételére a legegyszerűbb módszer a *sokrétű pinch (diverse pinch)* elvének alkalmazása. Ennek lényege a következő.

Az összetett vonalak szerkesztését vagy a hőkaszkád-számítást *shifted* (módosított) hőmérsékletekkel végezzük. De nem egységes MAT/2 értékkel módosítjuk az egyes áramok hőfokait, hanem minden egyes áramhoz eltérő értékkel. Nem is ragaszkodunk egy előre adott MAT értékhez (ez a továbbiakban amúgy is értelmetlen), hanem egy újfajta paramétert fogunk használni. Az egyes áramokhoz tartozó egyedi hőfokmódosításokat fordítottan arányosnak vesszük az áram hőátadási tényezőjével:

$$\Delta T_i = \frac{\kappa}{\alpha_i}$$

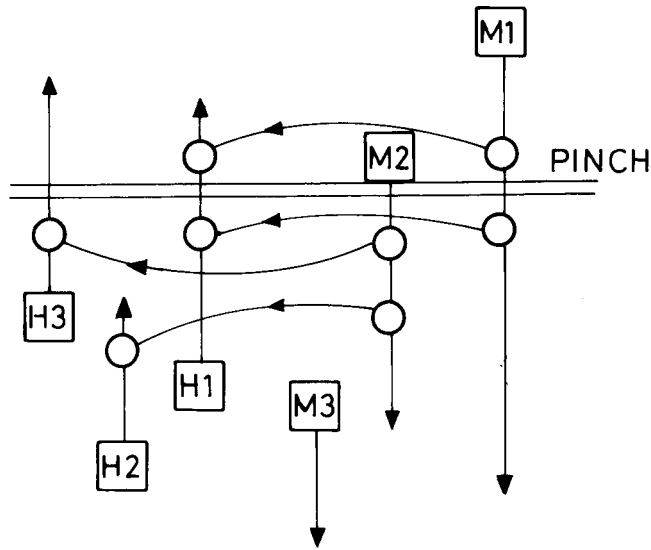
ahol  $\kappa$  az egész rendszerre nézve közös paraméter, ami a MAT szerepét veszi át. Ezzel a konvencióval olyan HH-t tervezünk, melyet közel egyenletes hőáram-sűrűség ( $Q/A$ ) jellemez.

Az így módosított (*shifted*) hőmérsékleteket használva, olyan rácsot kapunk, amit pl. a **10. ábra** mutat. Hajlított vonalakkal rajzoltuk be a pinch tervezésnél, majd azt követően kijelölt főbb csatolásokat. A kezdeti pinch-tervet hagyományos fokozatos fejlesztéssel optimálissá lehet alakítani. Ezzel elkerültük a topológiai csapda kialakulását. A topológiai csapda tehát csak a feladat elégtelen (nem adekvát) kezelését tükrözte.

A szupertargeting is megfelelően módosítandó a sokrétű pinch esetén. A BATH-formulát lehet alkalmazni továbbra is, de mivel *sokrétű shifted* hőfokokat használunk, az egyes intervallum-végek jellemző hőfokkülönbségeit az alábbi képlettel kell számítani:

$$\Delta T_m = \Delta T_{sf} + \frac{1}{Q_k} \sum_i q_i \Delta T_{i,sf}$$

ahol az  $sf$  index a shifted hőfokokra utal, az  $i$  index az aktuális áramra,  $q$  egy adott áram kínálata vagy igénye az adott intervallumban,  $k$  az energia-intervallum indexe, és  $Q$  az intervallum hossza. A szupertargeting költség-diagramját a  $\kappa$  paraméter függvényében kell felrajzolni.



3.10. ábra