



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

Vegyipari Folyamatok Optimalizálása Matematikai Programozással

Tézisfüzet

Szerző: Abdulfatah M. Emhamed
Témavezető: Dr. Lelkes Zoltán

2009



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

Bevezetés

Az optimalizálás igen fontos eszköz a vegyiparban, mivel alkalmazásával a profit maximalizálható (vagy az energiafelhasználás, vagy termelési költség minimalizálható). Az optimalizálási technikáknak minden tudomány- és mérnöki területen vannak alkalmazásaik. Ahogy a rendszer egyre bonyolultabbá válik, úgy lesz a szabályozása és optimalizálása egyre fontosabb, ezért ez a tudományterület ma már alapvető fontosságú.

Sok vegyipari tervezési feladat leírható mint vegyes egész értékű programozási feladat. Fő célja ennek a doktori értekezésnek a vegyes-egész értékű programozás alkalmazása néhány valós ipari probléma optimális megoldásának érdekében, nevezetesen 1) extraktív desztilláció elemzése és tervezése az optimális konfiguráció kiválasztásával együtt, 2) anyagcserélő hálózatok optimális kijelölése, 3) tengervíz sótalanító üzemek helyének és a hozzájuk tartozó csővezetékek kapcsolatrendszerének kijelölése. Ezek a problémák anyag- és hőcserélő folyamatokat tartalmaznak.

Matematikai programozás alkalmazásának folyamata tervezés és folyamatintegrálás területén három lépésből áll: az első lépés azon lehetséges struktúrák egy reprezentációjának megalkotása, amelyek köréből az optimális megoldást kiválasztjuk.

A második egy matematikai program megalkotása, amely általában mind diszkrét, mind folytonos változókat is tartalmaz, előbbit a struktúra, utóbbit a műveleti paraméterek kódolására.

A harmadik lépés az így kapott modell megoldása, és így az optimális megoldás kijelölése.

A matematikai program változókból, a rájuk vonatkozó korlátokból és egy célfüggvényből áll.

A korlátok matematikai összefüggések, amelyek a változókra vonatkozó fizikai, technológiai, gazdasági vagy egyéb típusú megkötéseket fejeznek ki. Az értéket kapott változók egy teljes halmazát megoldásnak nevezzük. Azon megoldásokat, amelyek minden korlátot kielégítenek, megvalósítható megoldásoknak hívjuk. A megoldásokat célfüggvény-értékük (lehet az költség, profit, stb.) alapján egymással összevetjük.



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

Irodalmi háttér

Az értekezés első témaköre extraktív desztillációs folyamatok elemzésével és optimalizálásával foglalkozik. Ezen folyamatok tanulmányozása különösen fontos annak érdekében, hogy alaposan megérthessük őket, és ennek alapján sikeresen tervezhessünk gazdaságilag optimális rendszereket. Folyamatszimulátorokat gyakran használnak annak érdekében, hogy az extraktív desztillációs folyamatok különös viselkedését tanulmányozzák. Általában HYSIS-t használnak extraktív desztilláció szigorú modellezésére, és néha optimalizálására is.

Munoz és tsai. (2006) a kétnyomásos és az extraktív desztillációt hasonlította össze, és megállapította, hogy kisebb kapacitású üzemek hatékonyabban működnek kétnyomásos rektifikálással, míg nagyobb üzemek esetén az extraktív desztilláció lesz gazdaságilag vonzóbb.

Hilal és tsai. (2001) az extraktív ágens felhasználásának csökkentésének (és ezáltal az energiafelhasználás csökkentésének) lehetőségét vizsgálta a betáptányér helyének változtatásával.

Langston és tsai. (2005) az oldószer betáplálási helye(i) és állapotának a szétválasztás minőségére gyakorolt hatását vizsgálta.

Desztilláló rendszerek optimális tervezésének hosszú története van az irodalomban. A javuló számítástechnikai lehetőségeknek köszönhetően a szigorú matematikai modellezés hatékony alternatíváját jelenti a hagyományos shortcut módszereknek.

Mivel a műveleti paraméterek mellett a tényérok száma is meghatározandó, bináris változók szükségesek ezek létének modellezéséhez. Mivel nemlineáris egyenletek írják le a fázisegyensúlyokat, a probléma vegyes egész értékű nemlineáris programként (MINLP) formulázható.

A desztilláló kolonnák modellezésére megalkotott korábbi szigorú matematikai modellek két csoportra oszthatók: (1) egy feladat – egy egység reprezentációk (Viswanathan és Grossmann, 1993), (2) változó feladat – egység reprezentációk (Yeomans és Grossmann, 1999).

Farkas és tsai. (2008) megalkottak egy új szuperstruktúrát és MINLP modellt. Annak érdekében, hogy a strukturális redundanciát már a szuperstruktúra kialakítása fázisában ki lehessen zárni, az feltételes egységek különböző, a kettő hatványainak megfelelő számú tényért tartalmaznak. Ennek következményeképpen a modell minimális számú bináris változót használ, ezáltal csökkentve a probléma méretét és így a számítási időt.



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

Az értekezés második témaköre anyagcserélő hálózatok optimalizálására kidolgozott hibrid módszer tárgyalásával foglalkozik. Bár ezek az alkalmazások nincsenek még használatban a líbiai vegyiparban, az olajipar fejlődésének köszönhetően nagy jelentőségre fognak szert tenni a következő években.

Az anyagcserélő hálózatok egymásba kapcsolt anyagcserélő egységek olyan rendszerei, amelyek belső vagy külső szegényáramokat használnak bizonyos komponenseknek (általában szennyezőknek) a gazdag áramokból történő eltávolítására.

Anyagcserélő hálózatok kijelölését a következő módszerek segítségével lehet végezni: 1) fizikai és termodinamikai betekintés alkalmazásával, melyet Pinch-technikának hívnak, 2) matematikai programozással, 3) az előző kettő kombinációjának alkalmazásával, melyet hibrid módszerként illetnek.

A Hallale (1988) által hőcserélő hálózatok szintézisére kifejlesztett Pinch-módszert El-Halwagi és Manousiouthakis (1989) alakította át anyagcserélő hálózatok kezelésére.

A matematikai programozással történő megközelítések két csoportra oszthatók: 1) soros és 2) szimultán módszerek. Az első lényegében automatizált változata a Pinch-módszernek. El-Halwagi és Manousiouthakis (1990) közölt először egy automatizált szintézis eljárást. A soros elnevezés jelzi, hogy a szintézis feloszlik egy targeting és egy tervezési lépésre. Ennek következményeképpen a beruházási és üzemeltetési költség között megkötendő kompromisszum (trade-off) nincs teljesen figyelembe véve, ezáltal szuboptimális megoldásokhoz vezethet.

A szimultán módszerek ezzel szemben egységes egészként kezelik a problémát, és figyelembe veszik a beruházási és üzemeltetési költség közötti egyensúlyt, ld. Papalexandri és tsai. (1994) és Szitkai et al. (2006).

Anyagcserélő hálózatok kialakítására alkalmas hibrid szintézis módszert Msiza és Fraser (2003) közölt először. A hibrid módszer felépítéséhez a következők szükségesek: egy célérték az összes éves költségre, egy fizikailag értelmes kezdeti struktúra, egy hajtóerő diagram, és egy MINLP modell. A kezdeti struktúrát használjuk az MINLP modell inicializálására, a hajtóerő diagram pedig a tervező segítségére van abban, hogy különböző kezdeti struktúrákat generáljon az MINLP modell megoldásainak javítására. Az így felépített hibrid módszer olyan megoldást szolgáltat, amelynek célfüggvénye 10%-os intervallumban van az előzőleg generált Pinch-



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

megoldáshoz képest, és olyan hálózatokat, amelyek hasonló vagy jobb minőségűek, mint az önálló MINLP modellel kapható megoldások.

Ennek a módszernek azonban van három hátránya: (1) A kezdeti struktúrák legenerálása igen időigényes lépés. (2) A kezdeti struktúrák legenerálása nem automatikus, emberi beavatkozást igényel. (3) Csak a kezdeti struktúra változik az egyes iterációkban, az MINLP modell nem.

A célom olyan szisztematikus módszer kifejlesztése volt, amely kiküszöböli ezeket a hátrányokat, és minimalizálja az emberi beavatkozás szükségességét.

Az értekezés harmadik témaköre a víztisztító telepek és a kapcsolódó csővezeték optimális allokálásához kidolgozott módszer tárgyalásával foglalkozik.

Egy átfogó terv felvázolásának szükségességét a sivatagi települések előállított ivóvízzel történő ellátása érdekében már felismerték. Elhassadi tanulmányában (2008) megállapította, hogy ez leghatékonyabban sótalánító üzemek alkalmazásával érhető el.

Sótalánító üzemek optimális elhelyezésének olyan problémája, amelynek során minimalizáljuk rögzített pontoktól (tengervízvevő hely és települések) mért távolságukat, matematikailag egy elhelyezési problémaként fogalmazható meg.

Az üzemelhelyezési problémákat intenzíven tanulmányozzák a folytonos és diszkrét optimalizálással foglalkozó szakirodalomban. Lényeges elemei egy ilyen problémának a meghatározott igényekkel és koordinátákkal rendelkező fogyasztók, és az elhelyezendő üzemek. A cél megtalálni az üzemek optimális pozícióját a síkban úgy, hogy valamilyen mérhető célfüggvény, – leggyakrabban az üzemeknek a fogyasztóktól mért távolságának összege – minimális legyen. Egy hasznos áttekintést közölt ReVelle és Eiselt (2005).

A jelen értekezésben tárgyalt problémát, azaz megtalálni sótalánító üzemek optimális helyzetét és kijelölni a kapcsolatokat a tengervíz vevőhelytől az üzemekig, és üzemektől a településekig, még nem tárgyalták az irodalomban.

A legtöbb ilyen munka, ld. Özyurt és Realff (1999) és Klose és Drexl (2005), olyan problémával foglalkozik, ahol a cél az üzemek és fogyasztók közötti összes távolság minimalizálása. A legfontosabb különbség ez, és az új probléma között az, hogy itt a csővezetékköltségeket csak akkor vesszük figyelembe, ha valóban létezik kapcsolat (vízáram) az üzem és a fogyasztó között. Az enyémre leginkább emlékeztető probléma az elméleti multi-Weber probléma, ahol a feladat rögzített pontok alhalmazokba sorolása és az alhalmazokhoz olyan pontok rendelése, amelyektől



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

mért távolság az alkalmaz elemeitől minimális. Ezt a problémát általában heurisztikákkal oldják meg. Rosing (1991) azonban megmutatta, hogy a célfüggvény az optimum környékén nagyon meredeken változik. Ezért igen fontos lenne egzakt módszer alkalmazása, különben az eredmény igen távol kerülhet az optimumtól. Az egyetlen egzakt módszert erre a problémára Rosing (1992) fejlesztette ki, ez azonban még mindig erősen különbözik a jelen feladattól, és az eljárás nem alkalmazható az említett különbségek miatt.

Mivel az irodalomban nem található hasonló probléma, egy új modellt alkottam a feladat kezelésére. Az új modellt és az azzal kapott eredményeket mutatja be a jelen értekezés.

Számítási módszerek

Kutatómunkám nagy részét különböző MILP és MINLP modellek megalkotása és megoldása tette ki. Ehhez főként GAMS (Brooke és tsai., 1998) és AIMMS () modellezőkörnyezetet használtam. Először a GAMS programcsomagot választottuk, mert könnyen hozzáférhető, felhasználóbarát, és jól dokumentált. A közelmúltban azonban felbukkant egy hasonló termék, az AIMMS fejlesztőkörnyezet bukkant fel a piacon, grafikus felülettel, a felhasználó által kifejlesztett algoritmusok implementálására való képességgel, és egyéb jól kihasználható előnyökkel. Ezért ez utóbbi eszközt használtam az extraktív desztilláló rendszerek vizsgálatára.

A megoldószolverek, amelyekkel a kapott egyenletrendszereket megoldottam: (1) módosított AOA MINLP szolver komplex extraktív desztilláló rendszerek vizsgálatára, (2) DICOPT++ MINLP szolver anyagcserélő hálózatok szintézisére, és (3) CPLEX 7 MILP szolver a sótanító üzemek optimális helyzetének meghatározására.

Ezekből az első kettő szolver Outer Approximation algoritmust használ. A módszer nemlineáris és vegyes egész értékű programozási feladatokat felváltva old meg, így közelítve a megoldást.

Ezek a szolverek a kereskedelemben könnyen hozzáférhetőek.

Főbb tudományos eredmények

Bebizonyítottam, hogy az optimalizálás hatékonyan használható komplex extraktív desztillációs folyamatok elemzésére. Extraktív desztillációs folyamatok műveleti és



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

gazdaságossági szempontok alapján történő elemzése – bár nehezen és kényelmetlenül, de – megoldható folyamatszimulátorok alkalmazásával. Sok próbálkozást és kísérletezést igényel, ld. például Chadda et al. (2000) iterációs módszerét. A tényérszám és refluxarány minimum és maximum értékeinek meghatározása ilyen módon nehéz lehet, és optimalizálással könnyebben végrehajtható. A refluxaránynak egy adott konfigurációhoz tartozó minimum és maximum értékeinek meghatározása így egy lépésben megtörténhet egyetlen NLP feladat megoldásával. Hasonlóan, a tényérszám minimum és maximum értékeinek meghatározása szisztematikus kereséssel egyszerűbben megoldható, mint folyamatszimulátorok alkalmazásával.

Bebizonyítottam, hogy extraktív desztillációs folyamatok esetében az optimális oszlopkonfiguráció széles tartományban független a költségfaktorok értékétől. Ebből következik, hogy a költségfaktorok becslésekor elkövetett pontatlanságok, vagy a változó gazdasági környezet nem okoz változást az optimális oszlopkonfigurációban. Így extraktív desztillációs folyamatokba való beruházáskor a gazdasági kockázat nem jelentős, mivel az oszlopkonfiguráció közel optimális marad változó körülmények esetén is.

Kifejlesztettem egy új hibrid módszert anyagcserélő hálózatok optimalizálására. Az új módszer kiküszöböli a korábbi hibrid módszerek hátrányait. Az új algoritmus integer vágásokat és a hajtóerő diagram alapján számított korlátokat alkalmaz. Új kezdeti megoldást csak akkor generálunk, ha az MINLP megoldás nem megvalósítható. Különben az addig legjobb megtalált megoldást használjuk kiindulópontként. A módszert egy közepes méretű MENS feladaton teszteltük, amely öt gazdag- és három szegényáramot tartalmazott. Az algoritmus az optimális megoldást négy iterációs lépésben találta meg, a célfüggvény értéke minden iterációban javult. Az új módszer emberi beavatkozás nélkül, automatikusan végrehajtható.

Definiáltam egy új típusú, gyakorlati jelentőséggel bíró allokációs problémát. Az így definiált allokációs probléma megoldására kidolgoztam egy MILP modellt. A feladat megtalálni sótalanító üzemek optimális számát, típusát és helyzetét, továbbá a közöttük kialakítandó csővezeték-kapcsolatokat oly módon, hogy a környező emberi települések meghatározott vízigényét ki tudjuk elégíteni, minimális összes éves költség mellett. Az összes éves költség az üzemek és a csővezetékek beruházási költségéből, továbbá a termelés



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

és szállítás változó költségéből tevődik össze. Az új MILP modell figyelembe veszi a vízforrások kapacitását és adott helyzetét, az ivóvízigényeket, és az üzemek és csővezetékek költségeit. A modell képes tiltott zónák kezelésére is, ahová az üzemek nem helyezhetők. A modellt két egymást követő lépésben fejlesztettem ki: először egy egyszerűbb modellt alkottam, amely optimális megoldást ad rövid idő alatt, de nem képes figyelembe venni a csővezetékek elágazásának lehetőségét. Az így kapott megoldás redundáns csővezetékeket tartalmazhat, amelynek felesleges költségvonzatai vannak. A csővezetékek elágazásának lehetőségét egy javított modellben vettem figyelembe, amely jobb megoldást nyújt, de hosszabb megoldási idő alatt. A modelleket különböző méretű mintapéldákon teszteltem. Bebizonyítottam, hogy a napenergia hasznosításával történő sótalanítás gazdaságos alternatívája lehet a fordított ozmózis elvén működő sótalanító üzemeknek. Bár ekkor a kisebb kapacitásnak köszönhetően az ivóvíz fajlagos költsége nagyobb, kicsi sivatagi települések esetén, kisebb vízigény mellett a napenergiával működő üzemek alacsonyabb költséggel üzemeltethetők.

Tézisek

- I. Az optimalizálás hatékonyan használható komplex extraktív desztillációs folyamatok elemzésére. (3)
 - II. Extraktív desztillációs folyamatok esetében az optimális oszlopkonfiguráció széles tartományban független a költségfaktorok értékétől. (3)
 - III. Az új, anyagcserélő hálózatok optimalizálására általam kifejlesztett hibrid módszer kiküszöböli a korábbi hibrid módszerek hátrányait. (1)
 - IV. Az általam kidolgozott MILP modell alkalmas arra, hogy optimális megoldást adjon egy új típusú, gyakorlati jelentőséggel bíró allokációs problémára. (2)
 - V. A napenergia hasznosításával történő sótalanítás gazdaságos alternatívája lehet a fordított ozmózis elvén működő sótalanító üzemeknek. (2)
-



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

Az új tudományos eredmények alkalmazása

A tárgyalt tudományterület jellegének köszönhetően a kapott eredmények önmagukban mérnöki alkalmazások.

A komplex extraktív desztillációs folyamatok elemzésére kidolgozott módszert átdolgozzuk reaktív desztillációra.

Az anyagcserélő hálózatok szintézisére kidolgozott hibrid módszer kidolgozását és alkalmazását tárgyaló közleményt Isifiade és Fraser idézte 2008-ban. A hibrid algoritmus és a modell önmagukban is mérnöki alkalmazások.

A sótalánító üzemek elhelyezésére kidolgozott modellnek tényleges alkalmazása lehetséges a közeljövőben, ha az állami hatóságok felismerik a probléma jelentőségét.

Közlemények

Folyóiratcikkek

Abdulfatah M. Emhamed, Zoltán Lelkes, Endre Rév, Tivadar Farkas, Zsolt Fonyó and Duncan M. Fraser: “New hybrid method for mass exchange network optimization”, *Chemical Engineering Communications*, 2007, 194, 1688-1701. (IF: 0.45, I: 1)

Abdulfatah M. Emhamed, Barbara Czuczai, László Horváth, Endre Rév and Zoltán Lelkes: “Optimization of desalination location problem using MILP”, *AIChE Journal*, 2007, 53(9), 2367-2383. (IF: 1.607)

Abdulfatah M. Emhamed, Barbara Czuczai, Endre Rév and Zoltán Lelkes: “Analysis of Extractive Distillation with Mathematical Programming”. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(24), 9983–9995. (IF: 1.749)

Abdulfatah M. Emhamed, Barbara Czuczai, László Horváth, Endre Rév and Zoltán Lelkes: “An Improved Desalination Location Model Using Mixed-Integer Linear Programming”, Elfogadva a líbiai Alacademia Journal for Basic and Applied Sciences által



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

Konferenciák

Előadások

Abdulfatah M. Emhamed, Barbara Czuczai, László Horváth, Endre Rév and Zoltán Lelkes: “Desalination location model using mixed integer linear programming” CHISA-17, Prága, 2006. augusztus 27-31.

Abdulfatah M. Emhamed, Zoltán Lelkes, Endre Rév, Tivadar Farkas, Zsolt Fonyó and Duncan M. Fraser: “New Hybrid Method for Mass Exchange Network Optimization”, Műszaki Kémiai Napok, Veszprém, 2005. április 26-28.

Poszterek

Abdulfatah M. Emhamed, Zoltán Lelkes, Endre Rév, Tivadar Farkas, Zsolt Fonyó and Duncan M. Fraser. “New Hybrid Method for Mass Exchange Network Optimization”, European Symposium on Computer-Aided Process Engineering-15, 2005, 877-882.

Abdulfatah M. Emhamed, Barbara Czuczai, Endre Rév and Zoltán Lelkes. “Studying Extractive Distillation Processes Using Optimization”, European Symposium on Computer-Aided Process Engineering-18, 2008.

Irodalom

Bisschop, J.; and Roelofs, M. (2007) AIMMS. The Language Reference.

Brooke, A.; Kendrick, D.; and Maereus, A. (1992) GAMS A User’s Guide. Palo Alto.

El-Halwagi, M. M.; and Manousiouthakis, V. (1989) *AIChE Journal*, 35(8), 1233-1244.

El-Halwagi, M. M.; and Manousiouthakis, V. (1990) *Chemical Engineering Science*, 45(9), 2813-2831.

Elhassadi, A. (2008) *Desalination*, 220(1-3), 115–122.

Farkas, T.; Czuczai, B.; Rev, E.; and Lelkes, Z. (2008) *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(9), 3088-3103.

Hilal, N.; Yousef, G.; and Langston, P. (2002) *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(8), 673-679.



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

- Klose, A.; and Drexl, A. (2005) *European Journal of Operational Research*, 162(1), 4-29.
- Langston, P.; Hilal, N.; Shingfield, S.; and Webb, S. (2005) *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(3), 345-351.
- Msiza A. K.; and Fraser, D. M. (2003) *Computer-Aided Chemical Engineering*, 14, 227-232.
- Munoz, R.; Monton, J. B.; Burguet, M. C.; and de la Torre, J. (2006) *Separation and Purification Technology*, 50(2), 175-183.
- Özyurt, D. B.; and Realff, M. B. (1999) *AIChE Journal*, 45(10), 2161-2174.
- Papalexandri, K. P.; and Pistikopoulos, E. N. (1994) *Computers & Chemical Engineering*, 18(12), 1125-1139.
- ReVelle, C. S.; and Eiselt, H. A. (2005) *European Journal of Operational Research*, 165(1), 1-19.
- Rosing, K. E. (1991) *Environment and Planning B: Planning and Design*, 18(3), 347-360.
- Rosing, K. E. (1992) *European Journal of Operational Research*, 58(3), 414-426.
- Szitkai, Z.; Farkas, T.; Lelkes, Z.; Rev, E.; Fonyo, Z.; and Kravanja, Z. (2006) *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(1), 236-244.
- Viswanathan, J.; and Grossmann, I. E. (1993) *Computers & Chemical Engineering*, 17(9), 949-955.
- Yeomans, H.; and Grossmann, I. E. (1999) *Computers & Chemical Engineering*, 23(6), 709-731.
- Hallale (1988)
-