

Ενότητα 8

Δίκτυο εναλλακτών θερμότητας και βοηθητικών παροχών

8.1 Εισαγωγή

Μετά από την επιλογή του χημικού αντιδραστήρα και των φυσικών διαχωριστήρων, επόμενο βήμα, σύμφωνα με το μοντέλο του κρεμμυδιού, είναι ο σχεδιασμός δικτύου εναλλαγής θερμότητας για την αξιοποίηση της θερμότητας που παράγεται από μια διεργασία σε μια άλλη όπου χρειάζεται. Συμπληρωματικά, πρέπει να σχεδιαστεί ένα δίκτυο βοηθητικών παροχών για να καλύψει τις ανάγκες σε ενέργεια που δε μπορούν να ικανοποιηθούν μόνο με εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των διεργασιών.

Η χρήση βοηθητικών παροχών μόνο εφόσον απομένουν ενεργειακές ανάγκες ακάλυπτες από την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των διαφόρων διεργασιών είναι απαραίτητο βήμα για την εξοικονόμηση ενέργειας. Το πάγιο κόστος που συνεπάγεται, λόγω χρήσης εναλλακτών θερμότητας θα αποσβεστεί από τη μειωμένη κατανάλωση πηγών ενέργειας. Εκτός από αυτό, η ενεργειακή ολοκλήρωση είναι μια πρακτική πιο φιλική προς το περιβάλλον και εντάσσεται στο πνεύμα της αειφόρου ανάπτυξης (λιγότερες καύσεις και ελάττωση ρύπων από τα προϊόντα τους για παραγωγή ενέργειας, διαφύλαξη φυσικών πόρων).

Αφού, τελειώσει αυτό το στάδιο, η μονάδα ολοκληρώνεται με το σχεδιασμό για τη διαχείριση των αποβλήτων και απομένει το θέμα της αυτόματης ρύθμισης που θα εγγυάται ότι το όλο σύστημα θα λειτουργεί στις επιθυμητές συνθήκες και τυχόν αποκλίσεις από αυτές λόγω εξωτερικών παραγόντων θα αντιμετωπίζονται έγκαιρα. Το ζήτημα της διαχείρισης αποβλήτων και της περιβαλλοντικής προστασίας θα το εξετάσουμε μαζί με αυτό της υγιεινής και ασφάλειας στην τελευταία ενότητα. Εδώ θα αναφερθούμε στην ενεργειακή αριστοποίηση (εναλλάκτες θερμότητας και βοηθητικές παροχές).

8.2 Ενεργειακή αριστοποίηση – γραφική μέθοδος

Το ενδιαφέρον είναι ότι μπορούμε να κάνουμε ακριβείς υπολογισμούς σχετικά με τις απαιτήσεις σε εξοπλισμό για εναλλαγή θερμότητας, χωρίς να προσφεύγουμε σε εμπειρικούς κανόνες ή να ανησυχούμε για το αν το αποτέλεσμα ενός αλγόριθμου αντιπροσωπεύει τοπικό και όχι ολικό ελάχιστο. Η μέθοδος pinch-point που θα αναπτύξουμε, επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των απαραίτητων εναλλακτών και των θερμικών φορτίων τους, καθώς και των απαραίτητων βοηθητικών παροχών.

Αυτό που είναι ιδιαίτερα εξυπηρετικό με την ενεργειακή αριστοποίηση είναι ότι μπορούμε να θέσουμε στόχους όσον αφορά την εναλλαγή θερμότητας και βάσει αυτών να κάνουμε οικονομική αξιολόγηση της πάγιας επένδυσης πριν και χωρίς να χρειαστεί να σχεδιάσουμε το ίδιο το δίκτυο των εναλλακτών. Πράγματι, με καθαρά θερμοδυναμικά επιχειρήματα, μπορούμε να βρούμε τα θερμικά φορτία που θα εναλλάσσονται και από αυτά με σχέσεις της μορφής $Q = U A \Delta T_L$, όπου ΔT_L η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας, να βρούμε την επιφάνεια A του εναλλάκτη που αντιστοιχεί σε κάθε φορτίο Q , άρα και το πάγιο κόστος. Με βάση αυτά, μπορούμε, αν θέλουμε να μειώσουμε το κόστος, να αναθεωρήσουμε το σχεδιασμό του αντιδραστήρα και των διαχωριστήρων πριν προχωρήσουμε στο σχεδιασμό του δικτύου εναλλακτών και βοηθητικών παροχών. Έτσι, μπορούμε να κάνουμε πιο γρήγορα την εξέταση εναλλακτικών λύσεων χωρίς να χρειαστεί να προχωρήσουμε το δομικό σχεδιασμό και την αριστοποίηση μέχρι το τέλος για κάθε ξεχωριστή περίπτωση.

8.2.1 Έννοιες και ορισμοί: Σε μια διεργασία ή μονάδα διακρίνουμε **θερμά** και **ψυχρά** ρεύματα. Τα πρώτα είναι αυτά που ξεκινούν με υψηλή **θερμοκρασία παροχής** και θέλουμε να τα ψύξουμε σε μια χαμηλότερη **θερμοκρασία-στόχο**. Τα δεύτερα είναι αυτά που θέλουμε να θερμάνουμε ώστε να μεταβούν από μια χαμηλότερη θερμοκρασία παροχής σε υψηλότερη θερμοκρασία-στόχο.

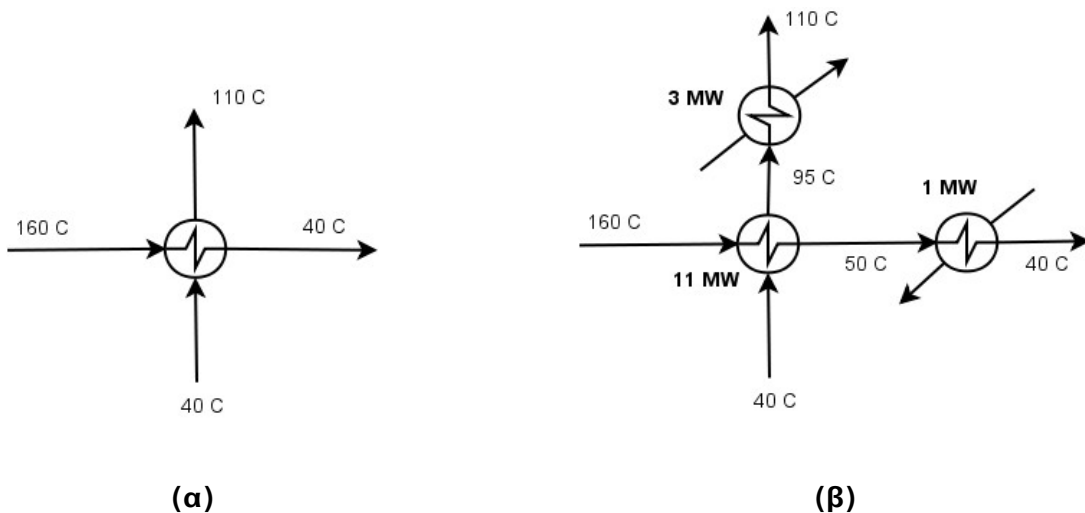
8.2.2 Πώς δουλεύουμε: Όταν έχουμε μια παραγωγική μονάδα με θερμά και ψυχρά ρεύματα, η πρώτη σκέψη είναι να χρησιμοποιήσουμε μια βοηθητική παροχή θέρμανσης, π.χ. ατμό, για τα ψυχρά ρεύματα και μια αντίστοιχη παροχή ψύξης, π.χ. νερό, για τα θερμά ρεύματα. Αυτό είναι αντιοικονομικό και επιπλέον αντιβαίνει τις σύγχρονες αντιλήψεις περί αιεφορίας που επιβάλλουν συνετή χρήση των ενεργειακών πόρων. Είναι και πιο συμφέρον και φιλικό προς το περιβάλλον να χρησιμοποιήσουμε την ενέργεια των θερμών ρευμάτων για να ανεβάσουμε τη θερμοκρασία των ψυχρών.

Συνήθως αρχίζουμε θεωρώντας μια ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά εναλλαγής θερμότητας ΔT_{min} . Αυτή εξαρτάται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιούμε. Οι εναλλάκτες αυλού-κελύφους που είναι οι πλέον διαδεδομένοι, χρειάζονται τουλάχιστον 10 βαθμούς διαφορά για να λειτουργήσουν αποδοτικά. Σε χαμηλότερες θερμοκρασιακές διαφορές απαιτείται αντιρροή που είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε αυτό το είδος εναλλακτών. Άλλες διατάξεις εναλλαγής θερμότητας δουλεύουν αποδοτικά ακόμη και για μικρότερες διαφορές, αλλά οι 10 βαθμοί μπορούν να θεωρηθούν μια τυπική τιμή.

Τα επόμενα βήματα θα φανούν καθαρότερα με δύο παραδείγματα όπου εισάγουμε τη γραφική τεχνική των **σύνθετων καμπυλών** θερμοκρασίας-ενέργειας (T-H).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-1: Ένα θερμό και ένα ψυχρό ρεύμα.

Θεωρούμε μία διεργασία που έχει ένα θερμό και ένα ψυχρό ρεύμα, όπως στο παρακάτω απλό Σχήμα 8-1 (α).



Σχήμα 8-1 (α) Παράδειγμα 8-1: απλή διεργασία με ένα θερμό και ένα ψυχρό ρεύμα και επιθυμητές μεταβολές θερμοκρασίας (β) Η ίδια διεργασία με βοηθητικές παροχές για την επίτευξη των θερμοκρασιών-στόχων και η μεταφερόμενη ενέργεια σε κάθε εναλλάκτη.

Τα χαρακτηριστικά των δύο ρευμάτων συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα.

	Θερμοκρασία παροχής, °C	Θερμοκρασία-στόχος, °C	Ενθαλπία, ΔH, MW	Ολική θερμοχωρητικότητα, FC _p , MW K ⁻¹ , kmol ⁻¹
Θερμό	160	40	-12	0.1
Ψυχρό	40	110	14	0.2

Παρατηρείστε ότι η θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται ως ΔH/ΔT και αφορά όλη την παροχή F του κάθε ρεύματος και όχι τη μονάδα μάζας.

Για να βρούμε πόση ενέργεια μπορούμε να μεταφέρουμε από το ένα ρεύμα στο άλλο, θα φτιάξουμε ένα διάγραμμα με κάθετο άξονα τις θερμοκρασίες και οριζόντιο τις ενθαλπίες. Κάνουμε την παραδοχή ότι η θερμοχωρητικότητα δεν αλλάζει με τη θερμοκρασία (αυτό θα μας βοηθήσει να κάνουμε απλά διαγράμματα με ευθείες γραμμές).

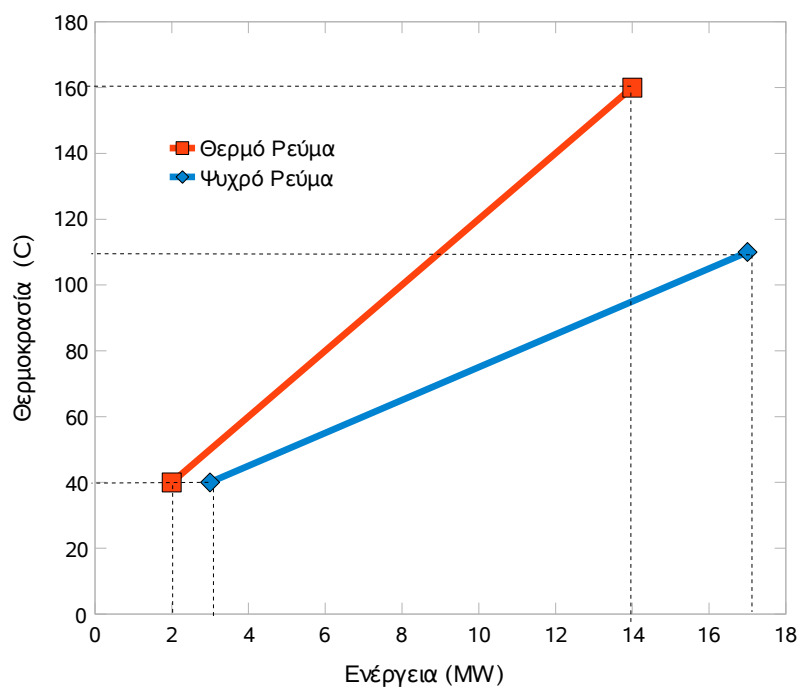
Αναφερόμενοι στο Σχήμα 8-2, εργαζόμαστε ως εξής: για το θερμό ρεύμα φτιάχνουμε μια ευθεία που αρχίζει από τη θερμοκρασία παροχής 160 και ένα αυθαίρετο σημείο στον άξονα των H που θεωρούμε ότι αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια του ρεύματος (αυτό που ενδιαφέρει είναι οι μεταβολές της ενέργειας. Εδώ επιλέξαμε την τιμή 14). Κατεβάζουμε την ευθεία προς τα αριστερά μέχρι το σημείο της θερμοκρασίας στόχου (40°C) και το σημείο του H-άξονα που είναι κατά 12 πιο αριστερά από το αρχικό (-12 είναι η μεταβολή της ενθαλπίας του ρεύματος που δίνεται πιο πάνω).

Πάμε να κάνουμε το ίδιο για το ψυχρό ρεύμα αλλά θυμόμαστε ότι πρέπει να υπάρχει μια διαφορά θερμοκρασιών ΔT τουλάχιστον 10 βαθμών. Δηλαδή, η θερμή γραμμή πρέπει να είναι πάντα πάνω από την ψυχρή και κατά τουλάχιστον 10 βαθμούς απόσταση. Αυτή η διαφορά αντιπροσωπεύει τη μικρότερη δυνατή κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των δύο ευθειών. Για να βρούμε σε ποιο σημείο υπάρχει αυτή η απόσταση, παρατηρούμε τα εξής: επειδή η κλίση είναι ΔT/ΔH, στο παράδειγμά μας η ψυχρή γραμμή ανεβαίνει πιο αργά, άρα το πλησιέστερο σημείο θα είναι προς τα κάτω, στις χαμηλές θερμοκρασίες. Άρα, θεωρούμε ότι όταν το ψυχρό είναι στους 40 βαθμούς, το θερμό θα πρέπει να είναι στους 50 (δηλαδή κάπου στον εναλλάκτη, θα έρχονται σε θερμική επαφή ρεύματα τοπικής θερμοκρασίας 50 και 40 βαθμών).

Βρίσκουμε το σημείο της θερμής γραμμής που αντιστοιχεί στους 50 και κατεβαίνουμε κατακόρυφα κατά 10 βαθμούς. Εκεί αρχίζει η ψυχρή γραμμή. Παρομοίως, βρίσκουμε το τέλος της ψυχρής γραμμής προς τα δεξιά κατά 14 μονάδες στον H άξονα και στη θερμοκρασία παροχής των 110 βαθμών.

Παρατηρούμε ότι οι ευθείες καλύπτονται (η μία είναι πάνω από την άλλη) για ένα εύρος ενθαλπιών και θερμοκρασιών: από 40 για το ψυχρό (50 για το θερμό) βαθμούς μέχρι τους 95 (160), αντίστοιχα. Αυτό το διάστημα αντιστοιχεί σε ΔH = 11 (οριζόντιος άξονας) που μπορεί να μεταφερθεί από το θερμό στο ψυχρό, αρκεί να έρθουν σε επαφή έτσι ώστε η θερμοκρασία του θερμού να μην έχει πέσει κάτω από τους 50 όταν το ψυχρό έρχεται σε επαφή μαζί του ξεκινώντας από τους 40. Τότε, θα φεύγει στους 95 όταν το θερμό ξεκινά στους 160.

Αριστερά έχει μείνει ακάλυπτο το θερμό για ΔH = 1. Εδώ χρειάζεται μια **ψυχρή βοηθητική παροχή** για να του χαμηλώσει τη θερμοκρασία μέχρι τους 40. Δεξιά έχει μείνει ακάλυπτο το ψυχρό για ΔH = 3. Εδώ χρειάζεται μια **θερμή παροχή** για να του ανυψώσει τη θερμοκρασία μέχρι τους 110. Σε αυτό το σημείο έχουμε ήδη πετύχει μια πρώτη εκτίμηση για τον εναλλάκτη θερμότητας. Από την εναλλασσόμενη θερμότητα ΔH και τη λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ΔT_L, βρίσκουμε την επιφάνεια εναλλαγής A = ΔH/UΔT_L όπου ο συντελεστής U δίνεται από τον προμηθευτή ή σχετική βιβλιογραφία. Από την επιφάνεια εναλλαγής μπορούμε να βρούμε το πάγιο κόστος.



Σχήμα 8-2 Καμπύλες H-T για τη διεργασία εναλλαγής θερμότητας του Σχήματος 8-1. Το μηδέν της ενέργειας είναι αυθαίρετο.

Επίσης, γνωρίζοντας τα απαιτούμενα θερμικά φορτία των βοηθητικών παροχών, μπορούμε να βρούμε πόσες θα είναι αυτές και το συνεπαγόμενο λειτουργικό κόστος. Η νέα κατάσταση με τις βοηθητικές παροχές και τα εναλλασσόμενα θερμικά φορτία, απεικονίζεται στο Σχήμα 1 (β).

Οι θερμοχωρητικότητες δεν αλλάζουν, άρα ούτε και οι κλίσεις των ευθειών. Όμως, το ΔT και οι συνδεόμενες με αυτό παροχές αλλάζουν. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορούμε να μετακινούμε τις καμπύλες δεξιά και αριστερά για να πετύχουμε το ΔT που θέλουμε. Επίσης, αντί για τη αρχική τιμή ΔT , μπορούμε να ορίσουμε τη μία από τις δύο βοηθητικές παροχές και να δούμε τι ΔT και τι τιμή για την άλλη παροχή θα προκύψει.

Ουσιαστικά, η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT (ή η μία από τις δύο βοηθητικές παροχές, αν θέλουμε), είναι Μεταβλητή Σχεδιασμού και τα θερμικά φορτία των βοηθητικών παροχών είναι Μεταβλητές Επίλυσης που υπολογίζονται με τη γραφική μέθοδο που εκθέσαμε (ή αντίστροφα, μια από τις παροχές είναι Μεταβλητή Σχεδιασμού και η άλλη, μαζί με τη ΔT , αποτελούν Μεταβλητές Επίλυσης). Από το συνυπολογισμό πάγιου και λειτουργικού κόστους μπορούμε να βρούμε και το οικονομικά άριστο ΔT το οποίο μπορούμε να υιοθετήσουμε εκτός αν είναι τεχνικά ανέφικτο λόγω των περιορισμών του εξοπλισμού που εξηγήσαμε.

8.2.3 Σύνθετες καμπύλες H-T για ομάδες ψυχρών και θερμών ρευμάτων.

Εξετάζουμε τώρα την περίπτωση όπου υπάρχουν περισσότερα θερμά και περισσότερα ψυχρά ρεύματα. Τότε, θα κάνουμε τις λεγόμενες **σύνθετες καμπύλες**, μία για όλα τα θερμά και μία για όλα τα ψυχρά ρεύματα. Για να τις κατασκευάσουμε, ακολουθούμε την εξής διαδικασία – εδώ θα αναφερθούμε στα θερμά και το ίδιο κάνουμε και για τα ψυχρά.

Κατ' αρχήν σημειώνουμε κατά αύξουσα σειρά όλες τις θερμοκρασίες όπου ξεκινά ή σταματά ένα θερμό ρεύμα.

Για κάθε διάστημα που ορίζεται από δύο διαδοχικές θερμοκρασίες βρίσκουμε ποια ρεύματα συνυπάρχουν σε αυτό. Θεωρούμε ότι σε αυτό το διάστημα υπάρχει ένα ρεύμα με θερμοχωρητικότητα ίση με το άθροισμα των θερμοχωρητικοτήτων αυτών των ρευμάτων. Τότε

κατασκευάζουμε για αυτό το διάστημα την αντίστοιχη απλή καμπύλη, όπως κάναμε στο προηγούμενο παράδειγμα.

Παρόμοια εργαζόμαστε και για τα ψυχρά ρεύματα και παίρνουμε τελικά δύο σύνθετες καμπύλες, μία για τα θερμά και μία για τα ψυχρά ρεύματα.

Για να τηρήσουμε την απαίτηση για ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT πρέπει να είναι και πάλι η καμπύλη των θερμών πάνω από αυτή των ψυχρών. Δοκιμάζοντας διάφορες θέσεις βρίσκουμε εκείνη όπου δεν υπάρχει σημείο με απόσταση κατά τον T-άξονα πιο μικρή από ΔT .

Το σημείο όπου η απόσταση είναι ακριβώς ΔT είναι το λεγόμενο **pinch point** ή **σημείο ανάκτησης θερμότητας** ή **κρίσιμο σημείο** και είναι κάπου ενδιάμεσα. Επειδή όμως, είπαμε ότι η ροή θερμότητας προϋποθέτει διαφορά $\Delta T > \Delta T_{\min}$, αυτό συνεπάγεται ότι στο κρίσιμο σημείο δεν υπάρχει ροή θερμότητας. Επομένως, τα ρεύματα που έρχονται σε επαφή στην περιοχή του κρίσιμου σημείου χωρίζονται σε δύο μέρη τα οποία ανταλλάσσουν θερμότητα ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αυτό σημαίνει ότι το κρίσιμο σημείο χωρίζει το διάστημα των θερμοκρασιών σε δύο τμήματα, το **άνω** ή **θερμό** και το **κάτω** ή **ψυχρό**. Αυτά τα δύο τμήματα μπορούν να σχεδιαστούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, δηλαδή δεν επικοινωνούν θερμικά μεταξύ τους. Όσον αφορά δε, τις βοηθητικές παροχές που θα χρειαστούν, ισχύουν τα εξής:

- Το άνω τμήμα είναι σε ισορροπία με τη θερμή παροχή: εκτός από αυτή, ούτε χάνει ούτε παίρνει άλλη θερμότητα.
- Το κάτω τμήμα είναι σε ισορροπία με τη ψυχρή παροχή: εκτός από αυτή, ούτε χάνει ούτε παίρνει άλλη θερμότητα.

Αν είχαμε μεταφορά από το πάνω στο κάτω τμήμα (ή και από το κάτω στο πάνω για θερμοκρασιακές διαφορές $0 < \Delta T < \Delta T_{\min}$) θα προέκυπτε *έλλειμμα* στο ένα τμήμα και περίσσεια στο άλλο. Το ίδιο και αν διαταραχθεί μια από τις δύο βοηθητικές παροχές. Θα πρέπει να αντισταθμιστεί από την άλλη. Άρα, το διάγραμμα των σύνθετων καμπυλών μας δίνει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, την *άριστη ενεργειακή λύση*. Απομένει να βρεθεί με ποιον ακριβώς τρόπο θα γίνει η εναλλαγή δηλαδή ποια ρεύματα θα συνδεθούν με τι εναλλάκτες. Πρώτα δίνουμε ένα παράδειγμα κατασκευής σύνθετων καμπυλών ενέργειας-θερμοκρασίας.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-2: διεργασία με δύο θερμά και δύο ψυχρά ρεύματα.

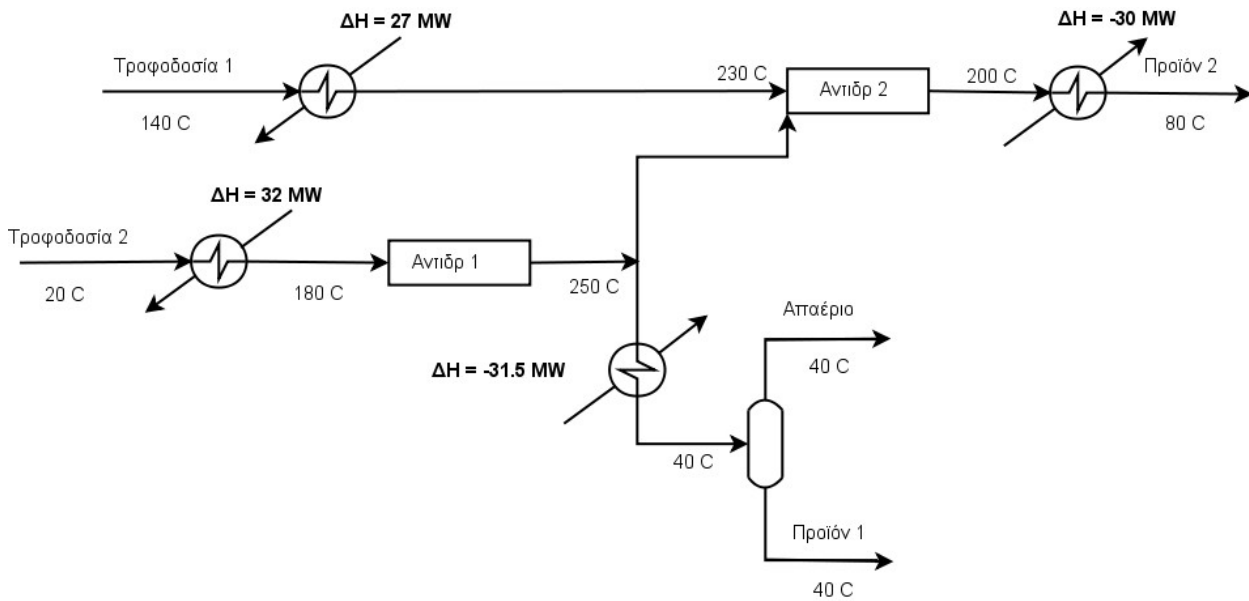
Θεωρούμε τη διεργασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 8-3. Αυτή περιλαμβάνει δύο αντιδραστήρες από τους οποίους ο ένας τροφοδοτεί με το ένα από τα προϊόντα του, τον άλλο. Οι επιθυμητές θερμοκρασιακές μεταβολές, μεταφερόμενες ενέργειες και θερμοχωρητικότητες δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Συσκευή	ρεύμα	είδος	Θερμοκρασία		Ενέργεια	Θερμοχωρητικότητα
			Αρχική	Στόχος		
Αντιδραστήρας 1	τροφοδοσία	Ψυχρό 1	20	180	32	0.2
Αντιδραστήρας 1	προϊόν	Θερμό 1	250	40	-31.5	0.15
Αντιδραστήρας 2	τροφοδοσία	Ψυχρό 2	140	230	27	0.3
Αντιδραστήρας 2	προϊόν	Θερμό 2	200	80	-30	0.25

Για τα θερμά διαστήματα, οι αρχικές και τελικές θερμοκρασίες που υπάρχουν είναι 40, 80, 200 και 250 °C, ενώ για τα ψυχρά αντιστοίχως είναι 20, 140, 180 και 230 °C. Καταstrώνουμε τον παρακάτω πίνακα όπου βρίσκουμε τη συνολική θερμοχωρητικότητα για τα θερμά ρεύματα σε κάθε διάστημα που ορίζουν οι παραπάνω θερμοκρασίες. Στη συνέχεια κατασκευάζουμε τη

σύνθετη καμπύλη αυτών. Παρόμοια θα εργαστούμε και για τα ψυχρά ρεύματα.

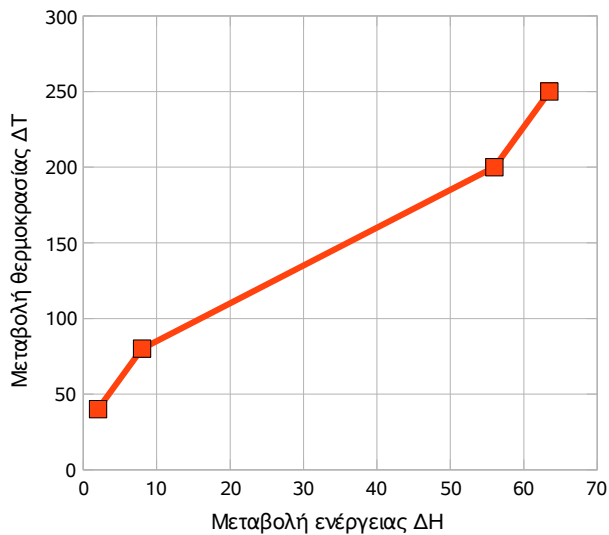
Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες			Ολική ενέργεια, ΔΗ
Αρχική	Τελική	Θ1	Θ2	Ολική	
200	250	0.15	---	0.15	7.5
80	200	0.15	0.25	0.40	48.0
40	80	0.15	---	0.15	6.0



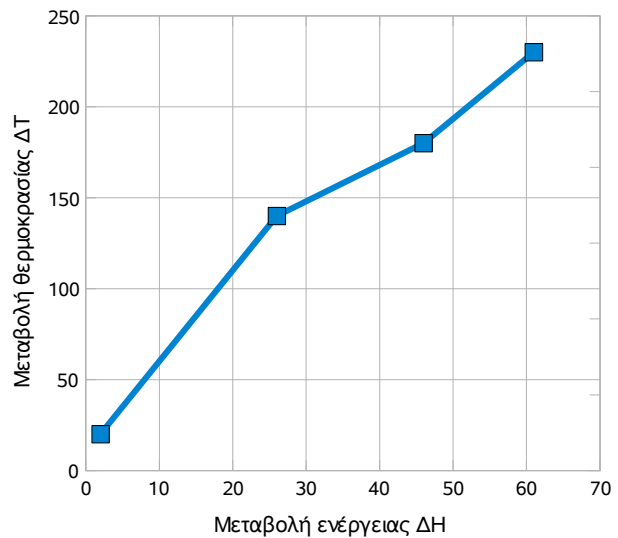
Σχήμα 8-3 Διεργασία με δύο θερμά και δύο ψυχρά ρεύματα, αναφορικά με το Παράδειγμα 8-2

Η ολική ανταλλασσόμενη ενέργεια ΔΗ στη δεξιά στήλη, προφανώς υπολογίζεται ως το γινόμενο της ολικής θερμοχωρητικότητας $\sum_i (F_i C_{p,i})$ επί την αντίστοιχη θερμοκρασιακή διαφορά ΔΤ και θα μας βοηθήσει στην κατασκευή της σύνθετης καμπύλης θερμών ρευμάτων. Αυτή την κατασκευάζουμε εργαζόμενοι για κάθε διάστημα ΔΤ με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα. Τότε, θα πάρουμε το παραπάνω διάγραμμα, Σχήμα 8-4 (α). Παρόμοια εργαζόμαστε για τα ψυχρά ρεύματα καταρτίζοντας τον επόμενο πίνακα και με τη βοήθεια αυτού, τη σύνθετη καμπύλη του Σχήματος 8-4 (β).

Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες			Ολική ενέργεια, ΔΗ
Αρχική	Τελική	Ψ1	Ψ2	Ολική	
180	230	---	0.3	0.3	15
140	180	0.2	0.3	0.5	20
20	140	0.2	---	0.2	24



(α)

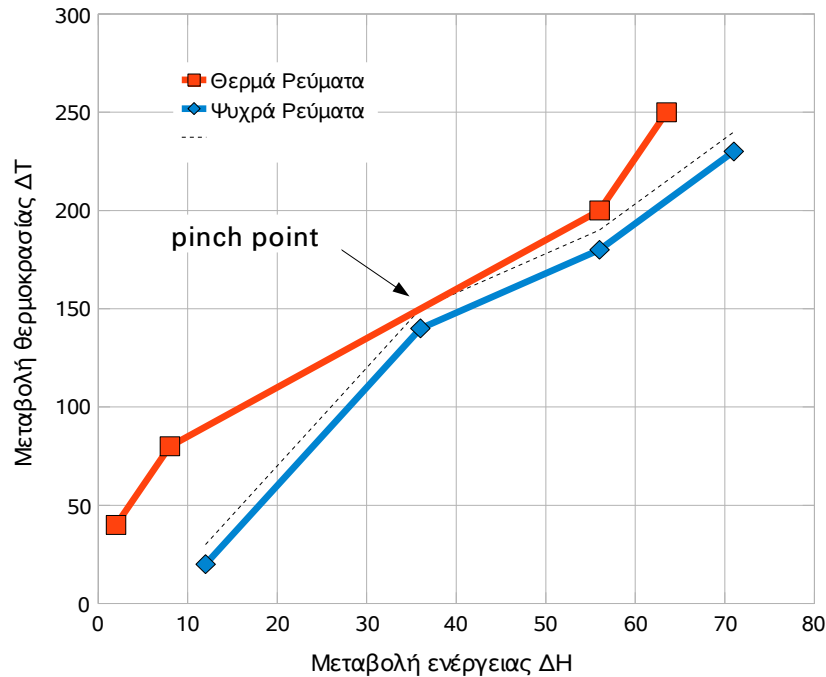


(β)

Σχήμα 8-4 *Σύνθετη καμπύλη θερμών (α) και ψυχρών (β) ρευμάτων για τη διεργασία του Σχήματος 3. Και στα δύο διαγράμματα, το μηδέν της ενέργειας είναι αυθαίρετο.*

Τότε είναι εύκολο να τοποθετήσουμε τις δύο γραμμές στο ίδιο διάγραμμα και να βρούμε τα διαστήματα της ενέργειας για τα οποία αλληλεπικαλύπτονται κατά την κατακόρυφη διάσταση. Πρώτα όμως, πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ ώστε να ισχύει πάντα $\Delta T > \Delta T_{\min}$ μεταξύ των δύο ρευμάτων οπουδήποτε κι αν έρχονται αυτά σε επαφή. Στη γραφική παράσταση, η ψυχρή καμπύλη πρέπει να απέχει κατακόρυφα πάντα τουλάχιστον 10 βαθμούς από τη θερμή καμπύλη που θα βρίσκεται από πάνω. Για να βρούμε την κατάλληλη σχετική θέση για τις δύο καμπύλες, μετακινούμε αριστερά ή δεξιά την ψυχρή σε σχέση με τη θερμή (ή τη θερμή σε σχέση με την ψυχρή) ώστε να βρούμε μία θέση (κρίσιμο σημείο) όπου η ελάχιστη μεταξύ τους κατακόρυφη απόσταση είναι ΔT_{\min} . Αυτό είναι πολύ εύκολο να γίνει με ένα πρόγραμμα όπως το Excel ή το OpenOfficeCalc, αρκεί να έχουμε ορίσει τις τιμές των ενεργειών σε σχέση με μια αρχική τιμή σε ένα κελί την οποία αλλάζοντας επηρεάζουμε και το διάγραμμα. Το αποτέλεσμα για το παράδειγμά μας φαίνεται στο Σχήμα 8-5. Η διάστικτη γραμμή είναι παράλληλη προς την ψυχρή καμπύλη αλλά απέχει κατακόρυφα 10 βαθμούς από αυτή και χρησιμεύει στο να μας διευκολύνει να βρούμε την κατάλληλη σχετική θέση των δύο καμπυλών που ικανοποιούν τον περιορισμό ΔT_{\min} (εκεί όπου η διάστικτη γραμμή αγγίζει τη θερμή καμπύλη, η ψυχρή απέχει ΔT_{\min}).

Τώρα, μπορούμε να εφαρμόσουμε και πάλι την ίδια λογική όπως και στο προηγούμενο παράδειγμά μας. Εκεί όπου οι καμπύλες αλληλεπικαλύπτονται κατακόρυφα, θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί από το θερμό στο ψυχρό ρεύμα. Στην περίπτωση μας και για τη δεδομένη ελάχιστη διαφορά των 10 βαθμών, η θερμότητα που μπορεί να μεταφερθεί μεταξύ των δύο ομάδων ρευμάτων είναι 51,5 MW. Εκεί όπου η ψυχρή σύνθετη καμπύλη εκτείνεται πέρα από την αρχή της θερμής καμπύλης, πάνω δεξιά στο διάγραμμα, δεν είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας και χρειάζεται μία εξωτερική θερμή παροχή, όπως ατμός. Το ενεργειακό διάστημα που μένει ακάλυπτο είναι η θερμή παροχή-στόχος που είναι και η ελάχιστη αναγκαία παροχή θέρμανσης, $Q_{h\min}$ η οποία εδώ βρίσκεται ίση με 7.5 MW. Παρόμοια, εκεί όπου η θερμή καμπύλη εκτείνεται πέρα από την αρχή της ψυχρής, κάτω αριστερά, χρειάζεται μια ψυχρή παροχή και το διάστημα που μένει ακάλυπτο βρίσκεται από το διάγραμμα ότι είναι 10MW και αντιπροσωπεύει την ελάχιστη αναγκαία ψυχρή παροχή-στόχο $Q_{c\min}$.



Σχήμα 8-5: Διάγραμμα κρίσιμου σημείου (pinch point) με τις σύνθετες καμπύλες του Σχήματος 8-4 τοποθετημένες ώστε να ικανοποιούν τον περιορισμό κατακόρυφης απόστασης $\Delta T_{min} = 10^\circ C$. Η διάστικτη βοηθητική γραμμή απέχει κατά $10^\circ C$ από την ψυχρή καμπύλη και χρησιμεύει στον εντοπισμό του κρίσιμου σημείου. Το μηδέν στον άξονα της ενέργειας είναι αυθαίρετο.

Η σχετική θέση των δύο καμπυλών είναι βαθμός ελευθερίας του προβλήματος και καθορίζεται αν δώσουμε είτε την ελάχιστη διαφορά ΔT είτε το θερμικό φορτίο μιας από τις δύο κατηγορίες βοηθητικών παροχών. Αν θέσουμε διαφορετικό ΔT , τότε μετακινώντας οριζόντια την ψυχρή καμπύλη, θα βρούμε διαφορετικές ελάχιστες παροχές και διαφορετική εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ψυχρών και θερμών ρευμάτων. Για παράδειγμα, για $\Delta T_{min} = 20^\circ C$ θα βρούμε θερμή και ψυχρή παροχή ίσες με 11.5 και 14 MW, αντίστοιχα. Για μεγαλύτερα ΔT , η ενέργεια των βοηθητικών παροχών και το αντίστοιχο κόστος αυξάνονται. Αντίθετα, αν ελαττώσουμε το ΔT , η ενέργεια και το κόστος της εξωτερικά παρεχόμενης ενέργειας ελαττώνεται, αλλά χρειάζεται μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας για να έχουμε μεταφορά ενέργειας από τα θερμά στα ψυχρά ρεύματα. Επομένως, αυξάνεται το πάγιο κόστος των εναλλακτών. Τότε, βρίσκουμε ότι υπάρχει μία ενδιάμεση τιμή της ελάχιστης ΔT όπου το συνολικό κόστος ελαχιστοποιείται. Όπως είπαμε πιο πάνω, αυτό εξαρτάται από το είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιούμε για την εναλλαγή θερμότητας. Αν δεν είναι γνωστό από την ανάλυση της συγκεκριμένης διεργασίας, τότε για εναλλάκτες κελύφους-αυλού λαμβάνεται ίσο με 10 βαθμούς, ενώ για άλλες διατάξεις εναλλακτών μπορεί να είναι μικρότερο.

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, οι θερμοκρασίες του κρίσιμου σημείου είναι 150 για τα θερμά ρεύματα και 140 για τα ψυχρά. Η απαίτηση για μια ελάχιστη ΔT μεταξύ των δύο ρευμάτων σημαίνει ότι σε κάθε άλλη θερμοκρασιακή περιοχή, η ΔT μεταξύ των ρευμάτων θα είναι μεγαλύτερη από 10 βαθμούς. Η ύπαρξη του περιορισμού για την ελάχιστη ΔT σημαίνει ότι δε μπορώ να μεταφέρω ενέργεια από κάποιο θερμό ρεύμα που βρίσκεται κάτω από το κρίσιμο σημείο σε κάποιο ψυχρό ρεύμα πάνω από το κρίσιμο σημείο ακόμη κι αν θερμοδυναμικά είναι δυνατό, γιατί η διαφορά τους $\Delta T'$ θα είναι πάντα μικρότερη από ΔT_{min} . Για άλλη μια φορά βλέπουμε ότι έχουμε χωρίσει, από ενεργειακή άποψη, τη διεργασία σε δύο τμήματα, το άνω ή

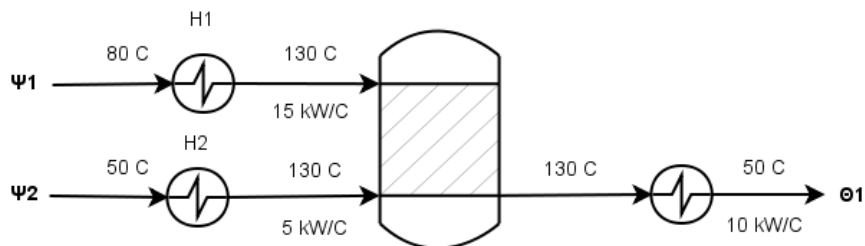
θερμό τμήμα και το κάτω ή ψυχρό τμήμα, τα οποία είναι θερμοδυναμικά ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Η μεταφορά ενέργειας από το θερμό προς το ψυχρό τμήμα είναι δυνατή ακόμη και αν γίνει από το ψυχρό ρεύμα προς το θερμό ρεύμα, γιατί υπάρχουν περιοχές στις καμπύλες τέτοιες ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη $\Delta T > \Delta T_{min}$. Όμως, αυτό θα προκαλέσει ένα έλλειμμα στο θερμό τμήμα και περίσσειμα στο ψυχρό τμήμα. Αυτά πρέπει να αντισταθμιστούν με αντίστοιχη αύξηση των βοηθητικών παροχών. Παρόμοια κατάσταση έχουμε αν διαταραχθούν οι εξωτερικές παροχές, δηλαδή θα χρειαστεί αύξηση της μιας παροχής για να αντισταθμίσει τη διαταραχή της άλλης. Οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για να πετύχουμε τον ενεργειακό στόχο που θέτουν οι σύνθετες καμπύλες για δεδομένη ελάχιστη ΔT είναι να μη μεταφέρουμε ενέργεια μέσω του κρίσιμου σημείου

- από διεργασία σε διεργασία,
- με ακατάλληλη χρήση των εξωτερικών παροχών.

8.3 Καταρράκτης θερμότητας (heat cascade)

Η γραφική μέθοδος που παρουσιάσαμε μας παρέχει μια οπτική αναπαράσταση της σχέσης και αλληλεπίδρασης μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων και εξωτερικών παροχών. Δεν είναι όμως αρκετά εξυπηρετική όταν θέλουμε να βρούμε το κρίσιμο σημείο γιατί πρέπει να κάνουμε δοκιμές μετακινώντας τις σύνθετες καμπύλες μέχρι να πετύχουμε την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά σε κάποιο σημείο. Επίσης, ενώ έχουμε καθορίσει το φορτίο των εξωτερικών παροχών, απομένει να απαντήσουμε το πολύ ουσιαστικό ερώτημα πώς ακριβώς θα γίνει η εναλλαγή θερμότητας, δηλαδή ποια ρεύματα θα συνδυαστούν μεταξύ τους και με πόσους και πόσο μεγάλους εναλλάκτες ώστε να πετύχουμε τον ενεργειακό στόχο που προσδιορίσαμε. Για να αντιμετωπίσουμε αυτά τα προβλήματα, θα παρουσιάσουμε μια άλλη παραλλαγή της μεθόδου του κρίσιμου σημείου μέσα από το επόμενο παράδειγμα.



Σχήμα 8-6: Διεργασία με δύο ψυχρά και ένα θερμό ρεύμα, παράδειγμα 8-3.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-3: διεργασία με ένα θερμό και δύο ψυχρά ρεύματα.

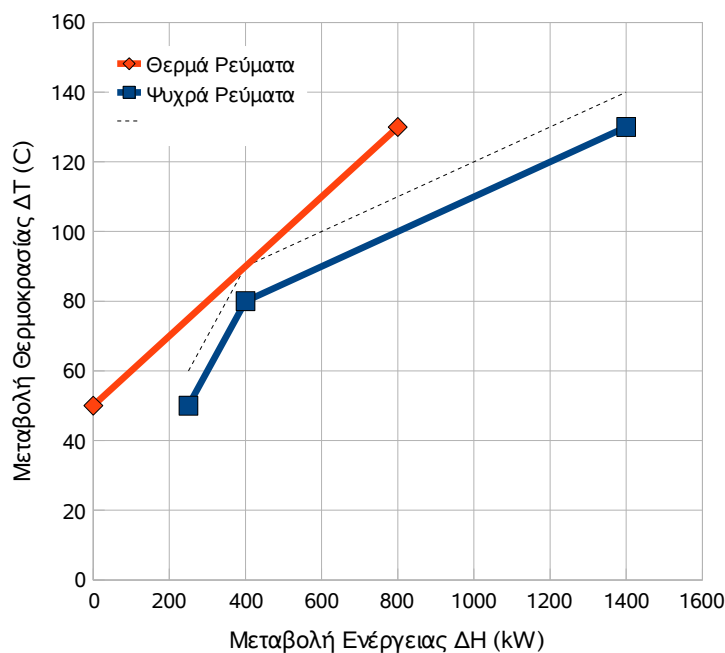
Θεωρούμε τη διεργασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 8-6, όπου δύο εισερχόμενα ρεύματα και ένα ρεύμα εξόδου έχουν τα χαρακτηριστικά που συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα (η ενέργεια μετριέται σε kW):

ρεύμα	είδος	Θερμοκρασία		Ενέργεια	Θερμοχωρητικότητα
		Αρχική	Στόχος		
τροφοδοσία	Ψυχρό 1	50	130	-400	5
τροφοδοσία	Ψυχρό 2	80	130	-750	15
προϊόν	Θερμό 1	130	50	800	10

Πρώτα εφαρμόζουμε τη γραφική μέθοδο που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα παραδείγματα. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται τα δεδομένα που αφορούν κάθε θερμοκρασιακό διάστημα και τα οποία μας επιτρέπουν να σχεδιάσουμε τις σύνθετες καμπύλες.

Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες				Ολική ενέργεια, ΔΗ
Αρχική	Τελική	Ψ1	Ψ2	Θ1	Ολική	
80	130	5	15	---	20	1000
50	80	5	---	---	0.5	150
130	50	---	---	10	10	800

Θεωρώντας και πάλι ελάχιστη διαφορά θερμοκρασιών ΔT μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων ίση με 10°C , κατασκευάζουμε τις παρακάτω σύνθετες καμπύλες, Σχήμα 8-7.

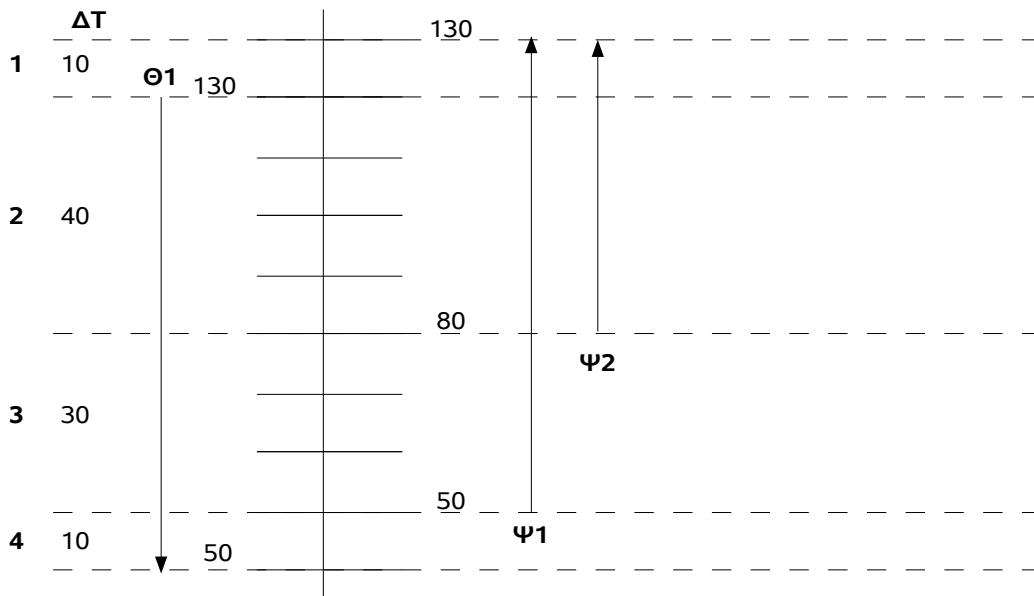


Σχήμα 8-7: Διάγραμμα κρίσιμου σημείου (pinch point) για τη διεργασία του Σχήματος 8-6 με τον περιορισμό $\Delta T_{min} = 10^\circ\text{C}$. Το μηδέν στον άξονα της ενέργειας είναι αυθαίρετο.

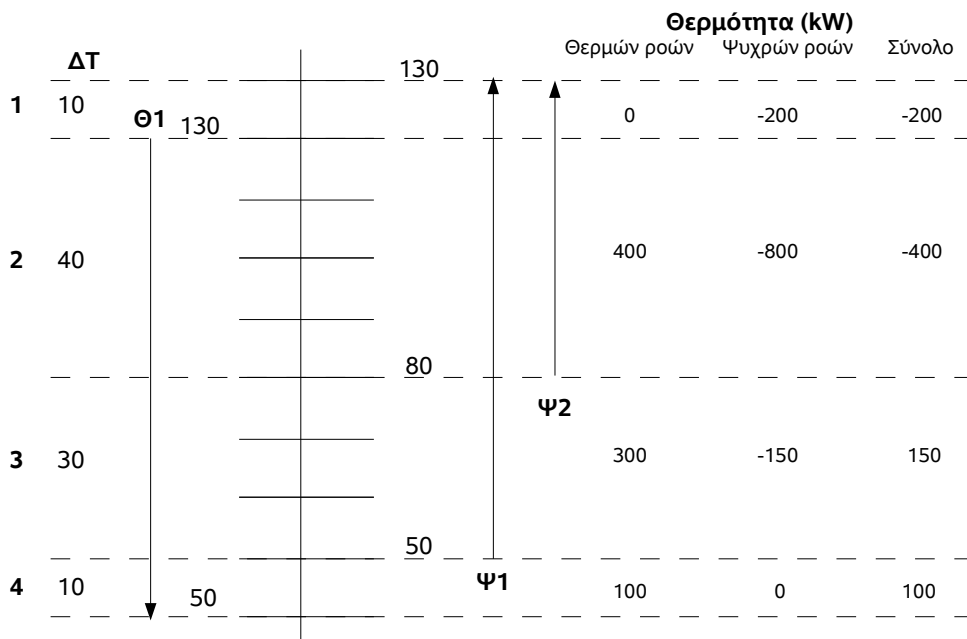
Το κρίσιμο σημείο βρίσκεται στους 80 / 90 βαθμούς. Από το διάγραμμα φαίνεται αμέσως ότι θα χρειαστεί μια θερμή βοηθητική παροχή ίση με 600 kW για να θερμάνει το ψυχρό ρεύμα πέρα από τη θερμοκρασία των 100 βαθμών όπου θα φτάσει με τη βοήθεια του θερμού ρεύματος. Η ψυχρή βοηθητική παροχή προσδιορίζεται ίση με 250 kW και θα ψύξει το θερμό ρεύμα από τους 75 μέχρι τους 50 βαθμούς που είναι ο στόχος. Εναλλακτικά, η δεύτερη παροχή μπορεί να βρεθεί από την πρώτη και ως εξής: το άθροισμα των ενεργειών των ρευμάτων είναι $-750 - 400 + 800 = -350$ kW έλλειμμα. Αν προσθέσουμε τη θερμή παροχή των 600 kW που βρήκαμε από το διάγραμμα, μένει περίσσειμα 250 kW που πρέπει να αντισταθμιστεί από μια ψυχρή παροχή.

Τώρα, πάμε να βγάλουμε το ίδιο αποτέλεσμα με άλλο τρόπο. Κατασκευάζουμε μία κατακόρυφη θερμοκρασιακή κλίμακα όπου από αριστερά σημειώνουμε τις θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων και από δεξιά αυτές των ψυχρών *υψωμένες κατά ΔT_{min}* ώστε το θερμό ρεύμα των 50 να είναι σε επαφή με το ψυχρό στους 40 βαθμούς, των 60 με τους 50 κλπ. Φέρνοντας οριζόντιες από τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες προμήθειας ή στόχου κάθε ρεύματος (από την αντίστοιχη

πλευρά της κλίμακας) ορίζουμε θερμοκρασιακά διαστήματα. Σχεδιάζουμε τα ρεύματα ως βέλη που αρχίζουν και τελειώνουν στις αντίστοιχες θερμοκρασίες, δεξιά ή αριστερά από την κλίμακα, ανάλογα με το είδος τους. Τα μέχρι στιγμής βήματα συνοψίζονται στο Σχήμα 8-8. Τα θερμοκρασιακά διαστήματα αριθμούνται από 1 έως 4 και έχουν εύρος που σημειώνεται αριστερά, στη στήλη ΔT .



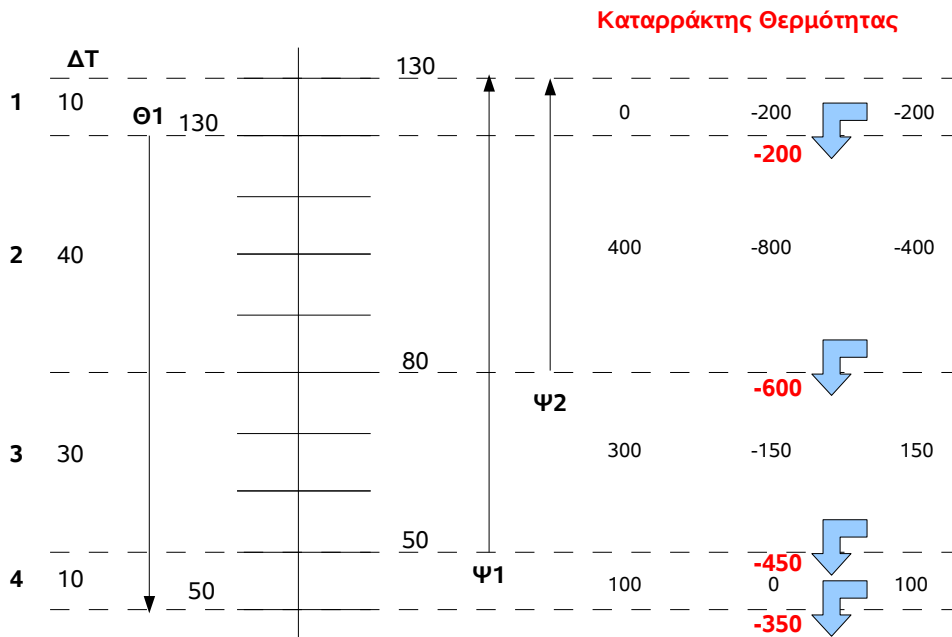
Σχήμα 8-8: Διπλή κλίμακα θερμοκρασιών και θερμά/ψυχρά ρεύματα για τη διεργασία του Σχήματος 8-6, με περιορισμό διαφοράς ΔT μεταξύ θερμών και ψυχρών ίσης με 10 βαθμούς.



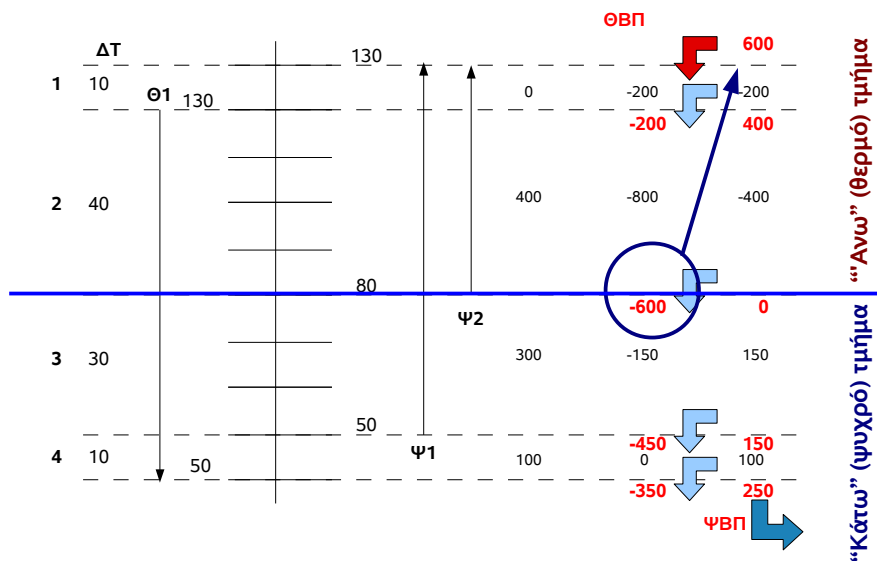
Σχήμα 8-9: Ενέργειες (ολικές, θερμών και ψυχρών ρευμάτων) για κάθε διάστημα θερμοκρασιών που ορίστηκε στο Σχήμα 8-8.

Τώρα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική θερμοχωρητικότητα όλων των θερμών και ψυχρών ρευμάτων που εμφανίζονται σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα από 1 έως 4. Από αυτή και το εύρος του διαστήματος υπολογίζουμε την ενέργεια ψυχρών και θερμών ρευμάτων, καθώς και τη συνολική και τις σημειώνουμε, όπως δείχνουμε στο Σχήμα 8-9. Συνεχίζουμε

κατασκευάζοντας το λεγόμενο **καταρράκτη θερμότητας** (heat cascade) που συνίσταται στο εξής: θεωρούμε ότι η θερμότητα του υψηλότερου θερμοκρασιακού διαστήματος υπ' αριθ. 1, όση κι αν είναι, "ρέει" προς τις χαμηλότερες θερμοκρασίες και προστίθεται αλγεβρικά στη θερμότητα του επόμενου διαστήματος. Το καθαρό άθροισμα κατεβαίνει με τη σειρά του στο επόμενο διάστημα κ.ο.κ. Έτσι, παίρνουμε τη ροή θερμότητας που απεικονίζεται στο Σχήμα 8-10.



Σχήμα 8-10: Καταρράκτης θερμότητας που κατασκευάζεται με βάση το Σχήμα 8-9



Σχήμα 8-11: Κρίσιμο σημείο και βοηθητικές παροχές για τη διεργασία του Σχήματος 8-6 με τη βοήθεια του καταρράκτη θερμότητας από το Σχήμα 8-10.

Βρίσκουμε ότι η θερμότητα που ρέει προς τα κάτω είναι αρνητική και μάλιστα φτάνει μία ελάχιστη τιμή ίση με -600 kW. Για να διορθώσουμε αυτό το αφύσικο στοιχείο, θα προσθέσουμε από την κορυφή μια εξωτερική παροχή ίση με +600 kW η οποία θα ρέει προς τα κάτω στο πρώτο θερμοκρασιακό διάστημα. Από το διορθωμένο ισοζύγιο προκύπτει και μια αποβαλλόμενη θερμότητα στη βάση του καταρράκτη ίση με 250 kW που αντισταθμίζεται από μια εξωτερική παροχή με αντίθετο πρόσημο. Δε χρειάζεται να πούμε ότι μόλις προσδιορίστηκαν η θερμή (600)

και ψυχρή (250) βοηθητική παροχή. Επιπλέον $600 - 250 = 350$ που είχαμε πει πιο πάνω ότι πρέπει να είναι η συνολική εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια. Επίσης, επειδή η θερμότητα που προσδώσαμε στην κορυφή είναι ίση με το μέγιστο έλλειμμα του καταρράκτη θερμότητας, εμφανίζεται ένα σημείο όπου η συνολική θερμότητα μηδενίζεται λόγω της αντιστάθμισης του ελλείμματος. Αυτό είναι το κρίσιμο σημείο που, για το παράδειγμά μας, εμφανίζεται στους 80 / 90 βαθμούς. Το κρίσιμο σημείο χωρίζει θερμοδυναμικά τη διεργασία στο άνω θερμό και το κάτω ή ψυχρό τμήμα, όπως είπαμε και πιο πριν. Όλα αυτά συνοψίζονται στο Σχήμα 8-11.

Τα αποτελέσματα είναι, φυσικά, ίδια με αυτά που έδωσε η γραφική μέθοδος. Αυτό στο οποίο πλεονεκτεί η μέθοδος του πίνακα και του καταρράκτη θερμότητας είναι ότι το κρίσιμο σημείο και οι εξωτερικές παροχές προκύπτουν αυτόματα και χωρίς να κάνουμε καμία δοκιμή, μετατόπιση καμπυλών κλπ, ώστε να ικανοποιήσουμε τον περιορισμό της ελάχιστης ΔΤ. Τώρα, απομένει να δούμε πώς θα υλοποιήσουμε το δίκτυο εναλλακτών και βοηθητικών παροχών για να πραγματοποιηθεί η εναλλαγή θερμότητας και να επιτευχθούν οι θερμοκρασιακές μεταβολές που υποδεικνύουν τα παραπάνω αποτελέσματα.

8.4 Άριστος Αριθμός Μονάδων Εναλλαγής Θερμότητας

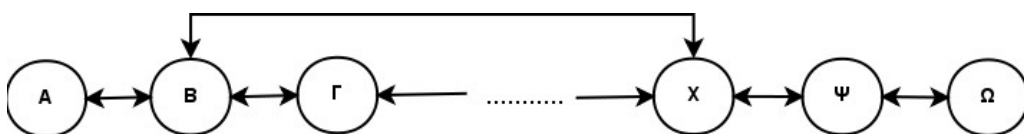
Κατ' αρχήν πρέπει να παρατηρήσουμε ότι ενώ η μείωση των βοηθητικών παροχών ελαττώνει το αντίστοιχο κόστος, η απαίτηση για εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων της διεργασίας συνεπάγεται την ύπαρξη εναλλακτών δηλαδή συσκευών που θα προσθέσουν πάγιο κόστος. Έτσι, πρέπει να υπάρχει κάποια ενδιάμεση κατάσταση όπου το συνολικό κόστος ελαχιστοποιείται.

Σε μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος ας δούμε ποιος είναι ο ελάχιστος δυνατός αριθμός Μονάδων Εναλλαγής Θερμότητας (ΜΕΘ). Κατ' αρχήν το άθροισμα των θερμοχωρητικότητων των ρευμάτων και των βοηθητικών παροχών είναι μηδέν επειδή εμείς προσδιορίσαμε τις τελευταίες έτσι. Οπότε μένει να βρούμε μέσα από ποιο δρόμο ή "συνδεσμολογία" θα κυλά η θερμότητα από το ένα ρεύμα ή παροχή στο άλλο. Για να το βρούμε αυτό σκεφτόμαστε ως εξής:

Ας πούμε ότι έχουμε N "στοιχεία" ή "αντικείμενα" που αντιπροσωπεύουν τα ρεύματα και τις βοηθητικές παροχές της διεργασίας μας και ας τα ονομάσουμε $A, B, \Gamma, \dots, \Omega$. Σε κάθε ένα αντιστοιχεί κάποια θερμότητα Q_i και ισχύει $Q_A + Q_B + \dots + Q_\Omega = 0$. Επίσης, κάποια από τα "αντικείμενα" είναι θερμές παροχές ή θερμά ρεύματα, ενώ τα άλλα είναι τα αντίστοιχα "ψυχρά αντικείμενα". Στη γενική περίπτωση, δεν ξέρουμε αν υπάρχουν και μικρότεροι συνδυασμοί μεταξύ τους που να εξισορροπούν τα θερμικά φορτία και ποιοι είναι αυτοί, π.χ. μπορεί σε μια διεργασία να ισχύει $Q_A + Q_B + Q_\Gamma = 0$, ενώ σε άλλη να μην ισχύει. Γι' αυτό πρέπει να υπάρχει πάντα ένας "δρόμος" που να επιτρέπει ροή θερμότητας από και προς όλα τα αντικείμενα, έστω και με τη μεσολάβηση άλλων. Ο πιο απλός τρόπος που μπορεί να σκεφτεί κανείς είναι μια αλυσίδα που συνδέει τα αντικείμενα μεταξύ τους, της μορφής:



δηλαδή, για N αντικείμενα θα έχουμε $N-1$ συνδέσεις που αντιπροσωπεύουν προφανώς $N-1$ εναλλάκτες θερμότητας. Αυτός είναι ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών για τη γενική περίπτωση επειδή αν αφαιρέσουμε οποιαδήποτε σύνδεση από τις $N-1$ θα κοπεί η αλυσίδα σε δύο τμήματα που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους και μπορεί να μην εξισορροπούνται τα θερμικά φορτία, εκτός από σύμπτωση. Αν πάλι, προσθέσουμε οποιαδήποτε άλλη σύνδεση θα σχηματιστεί μια κλειστή διαδρομή (βρόχος) όπως για παράδειγμα στο ακόλουθο σχήμα:



οπότε ξέρουμε ότι σε ένα δίκτυο που έχει βρόχους και δεν υπάρχουν αποκομμένες ομάδες

ρευμάτων / παροχών, θα έχουμε περισσότερους εναλλάκτες από τους ελάχιστους δυνατούς. Επειδή τα θεωρούμενα N "αντικείμενα" είναι παροχές και ρεύματα ($N = N_p + N_\pi$), τελικά θα ισχύει:

$$N_{\min} = N_p + N_\pi - 1 \quad (8-1)$$

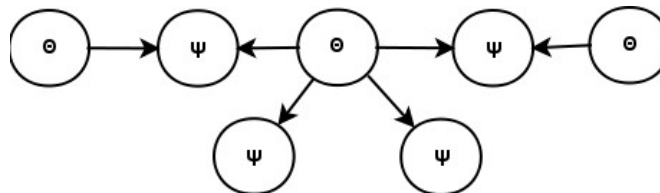
όπου N_p = αριθμός ρευμάτων, N_π = αριθμός βοηθητικών παροχών.

Φυσικά, δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί των παραπάνω αντικειμένων εφικτοί. Για παράδειγμα, τα ακραία "αντικείμενα" A και Ω της αλυσίδας θα πρέπει να μπορούν να ανταλλάσσουν όλο το θερμικό φορτίο τους με τα γειτονικά τους B και Ψ . Άρα, τα Q_A και Q_B πρέπει να είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσα ή μικρότερα από τα Q_Ψ και Q_Ω , αντίστοιχα. Αλλά και κάθε ενδιάμεσο στοιχείο πρέπει να εξαντλεί το φορτίο του, οπότε θα πρέπει να ισχύει επίσης $|Q_i| \leq |Q_{i-1} + Q_{i+1}|$ για $i = B, \Gamma, \dots, X, \Psi$. Αν δεν ισχύει αυτό για την προηγούμενη διάταξη, θα πρέπει να την αλλάξουμε, δηλαδή η ακόλουθη εικόνα μπορεί να ικανοποιεί τους παραπάνω περιορισμούς:



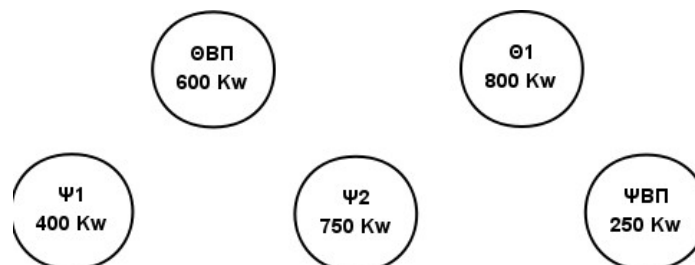
Επομένως, δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί κατάλληλοι για το σχηματισμό της αλυσίδας των ελάχιστων ΜΕΘ, αλλά μόνο όσοι εφαρμόζουν την **αρχή της εξάντλησης** των θερμικών φορτίων.

Σημειώνουμε ακόμη ότι θα μπορούσαν να υπάρξουν και δίκτυα με διακλαδώσεις όπως το παρακάτω όπου με Θ σημειώνουμε τα θερμά στοιχεία και με Ψ τα ψυχρά.



Το σκεπτικό που εκθέσαμε ως εδώ δεν αλλάζει στην ουσία του, γιατί για N στοιχεία θα πάρουμε και πάλι $N-1$ συνδέσεις (αρκεί να εφαρμόσουμε το ίδιο επιχείρημα σε κάθε διακλάδωση προσέχοντας να μετρήσουμε μόνο μία φορά τα κοινά στοιχεία), ενώ κάθε αύξηση αυτού του αριθμού θα προκύψει από βρόχο. Ο περιορισμός για τις τιμές των θερμικών φορτίων θα αναδιατυπωθεί κατάλληλα για να λάβει υπ' όψιν τους περισσότερους από δύο γείτονες. Άσχετα από αυτό, τα προηγούμενα και πάλι δεν είναι αρκετά γιατί δε σκεφτήκαμε αν οι θερμοκρασίες των συνδεδεμένων στοιχείων είναι τέτοιες που να επιτρέπουν τη ροή της θερμότητας (δηλαδή, λάβαμε υπ' όψιν τον πρώτο αλλά όχι ακόμη το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο).

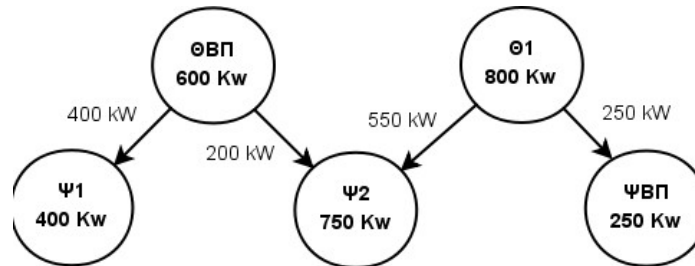
Ωστόσο, ας δούμε πρώτα την εφαρμογή του σκεπτικού μας ως εδώ στη διεργασία του παραδείγματος 8-3, πριν συνεχίσουμε για να βρούμε την ενεργειακά άριστη συνδεσμολογία. Θεωρούμε τα ρεύματα του παραδείγματος και τις βοηθητικές παροχές διατεταγμένα όπως στο επόμενο σχήμα, με τα θερμά στοιχεία από πάνω και τα ψυχρά από κάτω:



Σχήμα 8-12: Θερμά και ψυχρά στοιχεία στη διεργασία του Παραδείγματος 8-3.

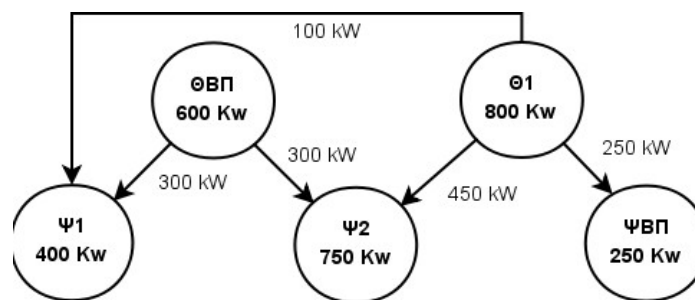
Θα προσπαθήσουμε να εξαντλήσουμε τα θερμικά φορτία συνδυάζοντας κατά ζεύγη τα θερμά με τα ψυχρά (οι αριθμοί τους το επιτρέπουν). Αν φέρουμε σε επαφή όλο το ρεύμα Ψ_1 με τη Θερμή Παροχή, θα ανταλλάγουν τα 400 kW του Ψ_1 και θα περισσέψουν 200 kW από τη $\Theta_{ΒΠ}$. Παρόμοια,

εξαντλούμε τα 250 της Ψυχρής Παροχής με το ρεύμα Θ1 και περισσεύουν από αυτό 550 kW που δεν καλύπτονται. Το άθροισμα των kW που περισσεύουν από ΘΒΠ και Θ1 είναι ίσο με το φορτίο του Ψ2 το οποίο και φέρνουμε σε επαφή με τα θερμά στοιχεία και ολοκληρώνεται η αλυσίδα με



Σχήμα 8-13: Ελάχιστες ΜΕΘ για τη διεργασία του παραδείγματος 8-3.

4 εναλλάκτες, δηλαδή τον ελάχιστο αριθμό με το σκεπτικό των προηγούμενων παραγράφων. Η εικόνα που παίρνουμε είναι αυτή του σχήματος 8-13. Οι γραμμές που συνδέουν τους κύκλους αντιστοιχούν σε Μονάδες Εναλλαγής Θερμότητας. Για κάθε στοιχείο, το φορτίο του ισούται με το άθροισμα των ενεργειών σε κάθε γραμμή που ξεκινά από ή φτάνει σε αυτό, π.χ. για τη ΘΒΠ: $600 = 400 + 200$ κ.ο.κ. Με την αρχή της εξάντλησης πετύχαμε τον ελάχιστο αριθμό ΜΕΘ και δεν είναι δύσκολο να δει κανείς ότι αν αυξήσουμε ή ελαττώσουμε κάποια από τις ανταλλασσόμενες ενέργειες κατά ένα ποσό θα δημιουργηθεί ανάλογο έλλειμμα ή περίσσειμα που πρέπει να καλυφθεί με τη βοήθεια ενός ακόμη εναλλάκτη, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, 8-14, όπου παρατηρούμε και την εμφάνιση βρόχου σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει:



Σχήμα 8-14: Δίκτυο ΜΕΘ με βρόχο για την κάλυψη ενεργειακού ελλείμματος

Τώρα, θα προσπαθήσουμε να εισάγουμε άλλον ένα περιορισμό για να πάρουμε ένα δίκτυο εναλλακτών που ξέρουμε ότι είναι θερμοδυναμικά εφικτό. Έχουμε πει ότι για να λειτουργούν ικανοποιητικά οι εναλλάκτες και να έχουμε ροή θερμότητας θα πρέπει να υπάρχει παντού μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ρευμάτων σε επαφή τουλάχιστον ΔT_{\min} π.χ. 10°C . Εκεί όπου παρατηρείται η ελάχιστη αυτή διαφορά θεωρούμε ότι δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας και είπαμε ότι αυτό είναι το κρίσιμο σημείο που χωρίζει τη διεργασία στο άνω ή θερμό τμήμα και το κάτω ή ψυχρό τμήμα τα οποία δεν ανταλλάσσουν ενέργεια, δηλαδή είναι "θερμοδυναμικά ανεξάρτητα". Αλλά τότε, μπορούμε να εφαρμόσουμε το προηγούμενο σκεπτικό για τον ελάχιστο αριθμό ΜΕΘ σε κάθε τμήμα χωριστά, ώστε να εξασφαλίσουμε ότι θα τηρείται πάντα ο περιορισμός για ροή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων που έχουν διαφορά θερμοκρασίας τουλάχιστον ΔT_{\min} . Δηλαδή μπορούμε να γράψουμε:

$$N_{\min,\alpha} = N_{\rho,\alpha} + N_{\pi,\alpha} - 1 \text{ για το "άνω" ή "θερμό" τμήμα και}$$

$$N_{\min,\kappa} = N_{\rho,\kappa} + N_{\pi,\kappa} - 1 \text{ για το "κάτω" ή "ψυχρό" τμήμα.}$$

Όπως είχαμε δει όμως, όταν σχεδιάζαμε τις σύνθετες καμπύλες, το κρίσιμο σημείο εμφανίζεται όταν, για δεδομένη ΔT_{\min} έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή αλληλεπικάλυψη της θερμής με την ψυχρή καμπύλη, δηλαδή τη μεγαλύτερη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων (χωρίς παραβίαση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου!) και επομένως, τις ελάχιστες

εξωτερικές παροχές, δηλαδή την ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση. Επομένως, το άθροισμα των ελάχιστων ΜΕΘ για τα δύο τμήματα είναι ο αριθμός ΜΕΘ που αντιστοιχεί στην ελάχιστη (εξωτερική) ενεργειακή κατανάλωση (ΕΕΚ) ή μέγιστη (εσωτερική) ενεργειακή ανάκτηση (ΜΕΑ):

$$N_{\min,EEK} = N_{\min,a} + N_{\min,k} \quad (8-2)$$

Αυτός είναι ο ζητούμενος ελάχιστος αριθμός ΜΕΘ γιατί αυτός ικανοποιεί όχι μόνο το ενεργειακό ισοζύγιο (πρώτος θερμοδυναμικός νόμος) αλλά και την προϋπόθεση της θερμοκρασιακής διαφοράς ώστε να υπάρχει ροή θερμότητας από το ένα ρεύμα στο άλλο (δεύτερος νόμος).

Ποια είναι η σχέση του ενεργειακά άριστου αριθμού ΕΕΚ με τον ελάχιστο δυνατό; Αυτό το βρίσκουμε ως εξής: σε κάθε τμήμα υπάρχουν ρεύματα που ανήκουν μόνο σε αυτό (θα τα σημειώνουμε με α,α και κ,κ) και ρεύματα που ανήκουν και στα δύο (τα σημειώνουμε με α,κ). Αναγκαστικά θα υπάρχουν ρεύματα κοινά και στα δύο τμήματα γιατί η λογική του κρίσιμου σημείου είναι η αλληλεπικάλυψη των σύνθετων καμπυλών, άρα και των ρευμάτων που αντιπροσωπεύουν. Τότε,

$$N_{\min,a} = N_{\rho,a,a} + N_{\rho,a,k} + N_{\pi,a} - 1$$

$$N_{\min,k} = N_{\rho,a,k} + N_{\rho,a,k} + N_{\pi,k} - 1$$

και

$$\begin{aligned} N_{\min,EEK} &= N_{\min,a} + N_{\min,k} = N_{\rho,a,a} + N_{\rho,a,k} + N_{\pi,a} - 1 + N_{\rho,k,k} + N_{\rho,a,k} + N_{\pi,k} - 1 \\ &= [(N_{\rho,a,a} + N_{\rho,a,k} + N_{\rho,k,k}) + (N_{\pi,a} + N_{\pi,k}) - 1] + N_{\rho,a,k} - 1 = (N_{\rho} + N_{\pi} - 1) + N_{\rho,a,k} - 1 \end{aligned}$$

δηλαδή

$$N_{\min,EEK} = N_{\min} + N_{\rho,a,k} - 1$$

Τώρα, μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις: να μην υπάρχουν ρεύματα κοινά και στα δύο τμήματα ($N_{\rho,ak} = 0$) ή να υπάρχει τουλάχιστον ένα ρεύμα που διέρχεται και από τα δύο ($N_{\rho,ak} \geq 1$). Αν ισχύει η πρώτη περίπτωση, αυτό σημαίνει ότι το κρίσιμο σημείο συμπίπτει με κάποια κορυφή γωνίας τόσο για τη θερμή όσο και για την ψυχρή καμπύλη. Τότε, τα δύο τμήματα, άνω και κάτω δεν είναι απλώς θερμοδυναμικά ανεξάρτητα αλλά συνιστούν δύο τελείως ανεξάρτητα δίκτυα που πρέπει να μελετηθούν χωριστά (ο αναγνώστης καλείται να επιβεβαιώσει με δικά του παραδείγματα ότι, σε αυτή την περίπτωση, ένα διάγραμμα ανάλογο με αυτά της παρούσας υποενότητας 8.4 δε θα ήταν συνεκτικό – δηλαδή θα παίρναμε δύο χωριστά, ασύνδετα σχήματα). Τότε, συμπεραίνουμε ότι αναγόμεσθε πάντα στη δεύτερη περίπτωση και αρκεί να ασχοληθούμε μόνο με αυτή.

Αφού υπάρχει τουλάχιστον ένα ρεύμα και στα δύο τμήματα, έπεται ότι ισχύει

$$N_{\min,EEK} \geq N_{\min} \quad (8-3)$$

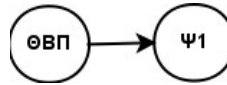
Το δίκτυο με τον ελάχιστο αριθμό εναλλακτών τείνει προς μικρότερο πάγιο αλλά μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος. Το δίκτυο ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης έχει μικρότερο λειτουργικό αλλά τείνει προς μεγαλύτερο πάγιο κόστος. Πιο κάτω θα δούμε πώς υπεισέρχεται η οικονομική αριστοποίηση στην τελική απόφαση για τη δομή του δικτύου εναλλακτών-παροχών.

8.5 Σύνθεση Δικτύου Εναλλακτών

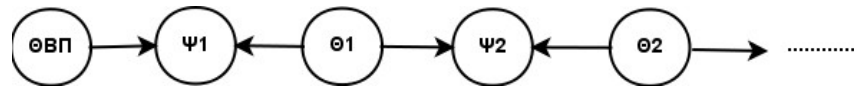
Όπως είπαμε, τα δύο τμήματα στα οποία χωρίζεται η διεργασία από το κρίσιμο σημείο μπορούν να εξεταστούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Επομένως, ουσιαστικά έχουμε να σχεδιάσουμε δύο δίκτυα εναλλακτών θερμότητας, ένα για το κάθε τμήμα. Εργαζόμενοι με βάση την αρχή της εξάντλησης θα προσπαθήσουμε να διατυπώσουμε μια μεθοδική διαδικασία εύρεσης του δικτύου που ικανοποιεί το κριτήριο της ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης. Θα αναφερθούμε στο θερμό

τμήμα και μετά θα μεταφέρουμε το σκεπτικό μας κατ' αναλογία και στο ψυχρό.

Το θερμό τμήμα παίρνει ενέργεια από τη θερμή βοηθητική παροχή και μαζί με τα θερμά ρεύματα αποδίδει θερμότητα στα ψυχρά. Θέλουμε κάθε θερμό στοιχείο να συνδέεται με ψυχρό για να είμαστε βέβαιοι ότι ισχύει ο περιορισμός της ελάχιστης ΔT . Τότε, ξεκινάμε τη σύνθεση ως εξής: συνδέουμε τη θερμή εξωτερική παροχή με ένα ψυχρό ρεύμα και παίρνουμε την επόμενη εικόνα.



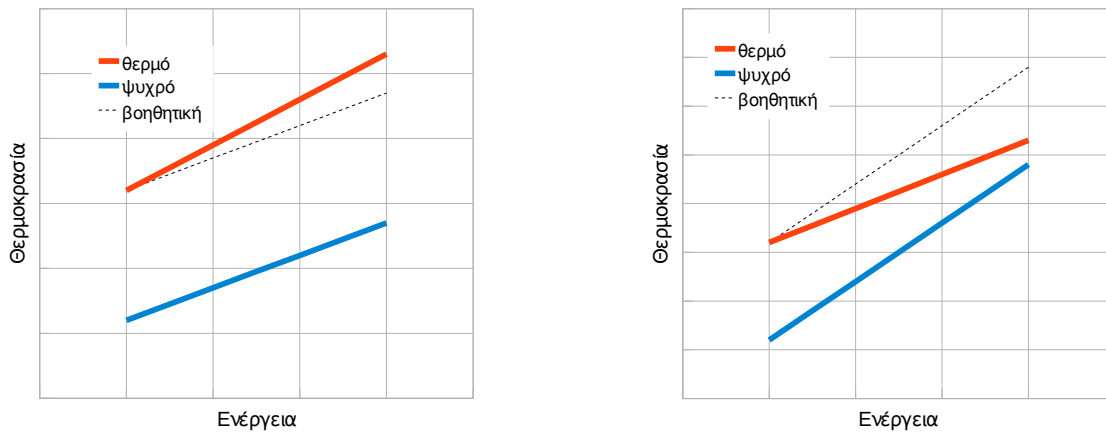
Αλλά το ψυχρό ρεύμα πρέπει να συνδεθεί με άλλο ένα θερμό ρεύμα για να συνεχίσουμε την αλυσίδα και αυτό με τη σειρά του, πρέπει να συνδεθεί με ένα ψυχρό κ.ο.κ. δίνοντας π.χ. την ακόλουθη εικόνα:



Προφανώς αν η θερμή παροχή είναι μεγαλύτερη από το Ψ_1 , από αυτή θα ξεκινά και άλλη μια τουλάχιστον διακλάδωση προς κάποιο άλλο ρεύμα Ψ_k , για την οποία όμως, ισχύει το ίδιο σκεπτικό περαιτέρω ανάπτυξης της. Επομένως περιοριζόμαστε στην παραπάνω εικόνα για να απλοποιήσουμε τη συζήτηση, αφού επί της ουσίας δεν αλλάζει κάτι.

Γενικά, κάθε θερμό ρεύμα πρέπει να συνδέεται με ένα τουλάχιστον ψυχρό στα πλαίσια του περιορισμού για την ελάχιστη ΔT , επομένως και ο αριθμός των θερμών ρευμάτων να είναι ίσος ή μικρότερος από αυτά (αν η διαφορά τους είναι πάνω από 1, προφανώς θα έχουμε κάποια διακλάδωση όπου ένα θερμό στοιχείο μπορεί να έχει π.χ. τρεις ψυχρούς γείτονες). Εκτός από τους γραφοθεωρητικούς λόγους που έχουν να κάνουν με τον ελάχιστο αριθμό συνδέσεων, $N-1$, μήπως υπάρχει και κάποιος θερμοδυναμικός λόγος που δεν πρέπει να είναι περισσότερα τα θερμά από τα ψυχρά και ποιος είναι αυτός; Και ακόμη, γιατί να μη θέσουμε αυτό τον περιορισμό για τα ψυχρά σε σχέση με τα θερμά; Απλούστατα, αν π.χ. έχουμε δύο θερμά και ένα ψυχρό, τότε θα πρέπει να τα συνδέσουμε και τα δύο με το ψυχρό, μα όταν το δεύτερο θερμό έρθει σε επαφή με το ψυχρό, αυτό... δε θα είναι πια τόσο ψυχρό και υπάρχει φόβος να παραβιαστεί η απαίτηση για ελάχιστο ΔT . Για τα ψυχρά δε θέτουμε τον περιορισμό αυτό γιατί θα ανταλλάξουν ενέργεια και με την εξωτερική παροχή που θα αποτελειώσει ο,τι δε μπόρεσαν να καλύψουν τα θερμά ρεύματα. Και τι γίνεται αν δεν ισχύει ο περιορισμός $N_\theta \leq N_\psi$; Τότε αναγκαστικά πρέπει να δημιουργήσουμε τα απαραίτητα ψυχρά ρεύματα για να συνεχιστεί η διαδικασία. Αυτό το κάνουμε **χωρίζοντας ένα ψυχρό ρεύμα** σε δύο και φυσικά, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία όσο χρειαστεί και με άλλα ψυχρά ρεύματα μέχρι να τα κάνουμε ίσα ή περισσότερα από τα θερμά.

Αφού βεβαιωθούμε ότι ικανοποιήθηκε ο περιορισμός για τη σχέση μεταξύ του αριθμού ψυχρών και θερμών, πάμε να τα συνδέσουμε μεταξύ τους. Εδώ σκεπτόμαστε ως εξής: καθώς το θερμό και το ψυχρό ανταλλάσσουν ενέργεια, το ένα ψύχεται και το άλλο θερμαίνεται. Για κάθε kJ που ανταλλάσσεται, η μεταβολή της θερμοκρασίας του καθενός είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη συνολική θερμοχωρητικότητα του ρεύματος, $(FC_p)_{\theta, i}$ ή $(FC_p)_{\psi, j}$. Αν το ψυχρό έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα από το θερμό, θα ζεσταθεί πιο γρήγορα απ' όσο ψύχεται το άλλο και η μεταξύ τους διαφορά θερμοκρασίας θα ελαττωθεί. Αν είμαστε μακριά από το κρίσιμο σημείο, αυτό μπορεί να μην πειράζει τόσο, γιατί γενικά οι σύνθετες καμπύλες τείνουν να απομακρύνονται η μία από την άλλη. Αλλά κοντά στο κρίσιμο σημείο υπάρχει σοβαρότερο ενδεχόμενο για μια τέτοια παραβίαση που σημαίνει ότι δεν πρέπει να φέρουμε σε επαφή ρεύματα με θερμοχωρητικότητες τέτοιες που να μειώσουν ανεπίτρεπτα τη μεταξύ τους ΔT .



Σχήμα 8-15 Εφικτή (αριστερά) και ανέφικτη (δεξιά) ανταλλαγή θερμότητας

Στο Σχήμα 8-15 απεικονίζεται παραστατικά το περιεχόμενο της επιχειρηματολογίας μας με ένα παράδειγμα. Στα διαγράμματα φαίνονται δύο ρεύματα που τα αριστερά τους άκρα βρίσκονται στο κρίσιμο σημείο, όπως φανερώνει και η διακεκομμένη βοηθητική γραμμή που εφάπτεται με αυτή του θερμού ρεύματος. Αλλά, στην αριστερή εικόνα η θερμοχωρητικότητα του ψυχρού είναι μεγάλη και αυτό ανεβάζει θερμοκρασία πιο αργά από το θερμό καθώς κινούμαστε δεξιά στον άξονα των ενεργειών. Έτσι, η ΔT που αρχικά ήταν ίση ΔT_{\min} , διευρύνεται και η ανταλλαγή ενέργειας έχει όλο και μεγαλύτερη κινητήρια δύναμη. Αντίθετα, στη δεξιά εικόνα, το ψυχρό ρεύμα έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα, ζεσταίνεται γρηγορότερα για κάθε kJ που παίρνει και η απαίτηση για ελάχιστη ΔT παραβιάζεται αμέσως. Στην πραγματικότητα, αυτή η ανταλλαγή ενέργειας δε μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Επομένως, εντοπίζουμε ένα ζεύγος ρευμάτων για το οποίο ο ρυθμός ψύξης $\Delta H_{\theta} / \Delta T$, του θερμού υπεραντισταθμίζεται από το ρυθμό θέρμανσης $\Delta H_{\psi} / \Delta T$, του ψυχρού, δηλαδή $(FC_p)_{\theta, i} \leq (FC_p)_{\psi, j}$. Αν βρω τέτοιο ζεύγος, το συνδέουμε και συνεχίζουμε με τα υπόλοιπα. Αν δε βρούμε, τότε θα πρέπει να διαχωρίσουμε ένα θερμό σε δύο μικρότερα με ανάλογα μικρότερη FC_p , για να υπάρξει τέτοιο ζεύγος. Τώρα, όμως αυξήσαμε και πάλι τον αριθμό των θερμών ρευμάτων και, πριν συνεχίσουμε, πρέπει να ελέγξουμε και πάλι αν ισχύει ο περιορισμός $N_{\theta} \leq N_{\psi}$ και να πράξουμε αναλόγως. Συνεχίζουμε την ίδια διαδικασία μέχρι να συνδέσω όλα τα θερμά και ψυχρά στοιχεία.

Για το ψυχρό ή κάτω τμήμα, η διαδικασία είναι εντελώς ανάλογη, μόνο που οι ρόλοι αντιστρέφονται, δηλαδή ο,τι κάναμε στα θερμά ρεύματα για το πάνω τμήμα θα κάνουμε στα ψυχρά για το κάτω τμήμα. Αυτό βρίσκεται σε ισορροπία με την ψυχρή παροχή που προσδιορίσαμε κατά την εύρεση του κρίσιμου σημείου. Ο,τι δεν καλύπτει η ψυχρή παροχή θέλουμε να το εξισορροπήσουν τα ψυχρά ρεύματα τα οποία θα κατανείμουμε όσο πιο "οικονομικά" μπορώ, με ίδιο σκεπτικό όπως κάναμε προηγουμένως για τα θερμά του άνω τμήματος. Στο τέλος κάθε τμήματος ελέγχω αν όντως τηρείται ο περιορισμός $\Delta T \geq \Delta T_{\min}$.

Ουσιαστικά, αυτό που κάνουμε στα πλαίσια της παραπάνω διαδικασίας είναι να εφαρμόσουμε την αρχή της εξάντλησης για να φτιάξουμε ανοιχτές αλυσίδες, με ή χωρίς διακλαδώσεις, θερμών και ψυχρών στοιχείων χωρίς βρόχους, μία για κάθε ένα από τα άνω και κάτω τμήματα, ώστε να πάρουμε τους "μαγικούς" αριθμούς $N_{\alpha} - 1$ και $N_{\kappa} - 1$ που, όπως εξηγήσαμε, θα μας δώσουν τον αριθμό εναλλακτών για ελάχιστη κατανάλωση εξωτερικών παροχών ή μέγιστη ανάκτηση της θερμικής ενέργειας της διεργασίας. Έτσι, οδηγούμαστε στο να σχεδιάσουμε ένα ενεργειακά άριστο δίκτυο εναλλακτών θερμότητας. Πρέπει να θυμόμαστε ότι αυτό το καταφέραμε χάρη στην εύρεση του κρίσιμου σημείου και τον προσδιορισμό, συγχρόνως, των βοηθητικών παροχών.

Συνοψίζουμε τα βήματα του αλγόριθμου σύνθεσης του δικτύου εναλλακτών για τα δύο τμήματα – οι ενέργειες για το ψυχρό γράφονται σε παρενθέσεις:

1. Ελέγχουμε αν ισχύει ο περιορισμός $N_{\theta} \leq N_{\psi}$ ($N_{\theta} \geq N_{\psi}$) για τους αριθμούς θερμών και ψυχρών ρευμάτων του τμήματος.
2. Αν όχι, διαχωρίζουμε ένα ψυχρό (θερμό) ρεύμα και πάμε πάλι στο βήμα 1.
3. Αναζητούμε ένα ζεύγος θερμού-ψυχρού για το οποίο να ισχύει $(FC_p)_{\theta, i} \leq (FC_p)_{\psi, j}$ ($(FC_p)_{\theta, i} \geq (FC_p)_{\psi, j}$), ιδιαίτερα αν βρίσκονται κοντά στο κρίσιμο σημείο και το συνδέουμε.
4. Αν δε βρίσκουμε τέτοιο ζεύγος διαιρούμε ένα θερμό ρεύμα, κατά προτίμηση κοντά στο κρίσιμο σημείο και πάμε στο βήμα 1.
5. Όταν τελειώσουμε με όλα τα ρεύματα, μοιράζουμε τη θερμή (ψυχρή) βοηθητική παροχή σε όλα τα ψυχρά (θερμά) ρεύματα που δεν έχουν φτάσει ακόμη στη θερμοκρασία-στόχο.
6. Αν δείξαμε ελαστικότητα και παραβιάσαμε το κριτήριο του βήματος 3 επειδή είμαστε μακριά από το κρίσιμο σημείο, ελέγχουμε αν υπάρχει παραβίαση του ΔT_{min} .

Στη διάρκεια εκτέλεσης των παραπάνω βημάτων, όταν εξαντλούμε ένα ρεύμα A που έρχεται σε επαφή με ένα ρεύμα B, το B μεταβάλλει τη θερμοκρασία του κατά $\Delta T_B = \Delta H_{AB} / (FC_p)_B$ όπου ΔH_{AB} η ενέργεια που μεταφέρεται μεταξύ A και B. Για να συνεχίσουμε στα επόμενα βήματα θα χρειαστεί να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία στην οποία έφτασε το ρεύμα B. Αυτή προφανώς θα είναι $T_{B2} = T_{B1} + \Delta H_{AB} / (FC_p)_B$. Προφανώς, η τελική θερμοκρασία του B δεν πρέπει να είναι πέρα από την τελική θερμοκρασία-στόχο όπου πρέπει να φτάσει. Αν συμβεί κάτι τέτοιο, το ρεύμα έχει εξαντληθεί θερμικά, η θερμότητα που πραγματικά ανταλλάχθηκε είναι $\Delta H_A = (FC_p)_B (T_{στόχος} - T_{B1})$ και πρέπει να υπολογιστεί η θερμοκρασία όπου έχει φτάσει το A, $T_{A2} = T_{A1} + \Delta H_{AB} / (FC_p)_A$.

Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι το δίκτυο ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης (EEK) δε συμπίπτει απαραίτητα με το δίκτυο των ελάχιστων ΜΕΘ. Το δεύτερο έχει μικρότερο αριθμό ΜΕΘ αλλά καταναλώνει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας μέσω των εξωτερικών παροχών. Για να βρεθεί το άριστο δίκτυο από οικονομική άποψη πρέπει να συγκριθούν αυτά τα δύο με οικονομικά κριτήρια. Ανάμεσα στα άλλα, θα χρειαστεί να υπολογιστούν οι επιφάνειες των εναλλακτών θερμότητας, για να εκτιμηθεί βάσει αυτών το πάγιο κόστος που τους αντιστοιχεί. Αυτό βρίσκεται από τη σχέση

$$A = Q / (U \Delta T_L) \quad (8-4)$$

όπου Q = η ανταλλασσόμενη θερμότητα

U = συντελεστής μεταφοράς, χαρακτηριστικός του τύπου του εναλλάκτη

ΔT_L = μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ίση με

$$[(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)] / \ln [(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)]$$

T_1, T_2 = θερμοκρασίες στα άκρα του ενός ρεύματος

T_3, T_4 = θερμοκρασίες στα άκρα του άλλου ρεύματος που έρχεται σε επαφή μέσω του εναλλάκτη.

Για να γίνει η οικονομική ανάλυση αριστοποίησης πρέπει να περάσουμε από τη λύση του δικτύου EEK που βρήκαμε με τον παραπάνω αλγόριθμο, σταδιακά σε άλλα δίκτυα με όλο και λιγότερες ΜΕΘ, φτάνοντας μέχρι το δίκτυο ελάχιστων ΜΕΘ. Αυτό γίνεται καταργώντας σταδιακά τους βρόχους που υπάρχουν εξαιτίας των ΜΕΘ επιπλέον του ελάχιστου αριθμού τους και διανέμοντας κατάλληλα το φορτίο των καταργούμενων ΜΕΘ στο υπόλοιπο δίκτυο. Ένας συστηματικός τρόπος για να το κάνουμε αυτό συνίσταται στο σκεπτικό κατά το οποίο το νέο δίκτυο θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν πιο οικονομικό ή λιγότερο “διαταραγμένο” ενεργειακά, σε σχέση με αυτό από το

οποίο προέρχεται. Αυτό θα γίνει αν αφαιρέσουμε μια ΜΕΘ με μικρό φορτίο, το οποίο τελικά θα διανεμηθεί κατάλληλα στις βοηθητικές παροχές. Έτσι, εντοπίζουμε το βρόχο με τη μικρότερη ΜΕΘ (κάθε δίκτυο που διαφέρει από αυτό με τις ελάχιστες ΜΕΘ έχει ένα τουλάχιστον βρόχο, όπως έχουμε πει). Αν το φορτίο της είναι Q_{min} και το μεταβάλλουμε κατά X τότε το αλγεβρικό άθροισμα των υπόλοιπων φορτίων του βρόχου θα πρέπει να μεταβληθεί κατά $-X$ για να διατηρηθεί η ενέργεια. Επομένως, αφαιρούμε αυτή τη ΜΕΘ μεταβάλλοντας το φορτίο της κατά $X = -Q_{min}$, το οποίο μεταφέρεται στις άλλες ΜΕΘ του βρόχου. Όμως τότε, για δεδομένες εξωτερικές παροχές θα υπάρξει οπωσδήποτε παραβίαση του ΔT_{min} σε κάποιο σημείο του (σπασμένου) βρόχου. Εντοπίζουμε αυτό το σημείο και προσθέτουμε ένα φορτίο Y στη θερμή παροχή που θα "κυλήσει" μέσω του προβληματικού σημείου μέχρι την ψυχρή παροχή. Κάνουμε ισοζύγιο σε αυτή τη διαδρομή ώστε το Y να επαναφέρει τη διαφορά θερμοκρασίας στο προβληματικό σημείο, στο ΔT_{min} .

Με αυτή τη διαδικασία, μπορούμε να απλοποιούμε τα δίκτυα, αφαιρώντας εναλλάκτες, αλλά με το κόστος ότι θα αυξάνεται η εξωτερική παροχή. Τα δίκτυα που προκύπτουν τα αξιολογούμε οικονομικά προσθέτοντας τις αποσβέσεις για τον πάγιο εξοπλισμό και τα λειτουργικά κόστη των εξωτερικών παροχών και επιλέγουμε αυτό με το μικρότερο κόστος. Μπορούμε όμως να προχωρήσουμε ακόμη πιο πέρα, χαλαρώνοντας τον περιορισμό για $\Delta T > \Delta T_{min}$, δηλαδή το φορτίο Y που θα προσθέσουμε στο απλοποιημένο διάγραμμα, μπορεί να επιλεγεί με οικονομική αριστοποίηση χωρίς απαραίτητα να επαναφέρει την ελάχιστη ΔT στο σημείο που αποκαθίσταται. Μπορεί να προκύψει και μια άλλη διαφορά θερμοκρασιών, μεγαλύτερη ή μικρότερη από το ελάχιστο όριο που θέσαμε αρχικά, πράγμα που σημαίνει ότι *τοπικά* το δίκτυο θα υπολειτουργεί αλλά *συνολικά* θα είναι πιο αποδοτικό και πιο οικονομικό. Το ίδιο το ΔT_{min} είναι βαθμός ελευθερίας με δύο έννοιες:

- Αν το μεταβάλλουμε στο δίκτυο ΕΕΚ που προσδιορίσαμε με την αρχική τιμή του ΔT_{min} , θα αλλάξουν τα θερμοκρασιακά διαστήματα, οι ροές μεταξύ των ρευμάτων και οι αντίστοιχες επιφάνειες των εναλλακτών, ενώ συγχρόνως θα μεταβάλλονται τα φορτία.
- Αν προσδιορίσουμε από την αρχή το δίκτυο ΕΕΚ, γενικά μπορεί να είναι διαφορετικό από αυτό που προσδιορίσαμε αρχικά.

Ολοκληρώνουμε τη συζήτηση με τον υπολογισμό των δικτύων ΜΕΘ για τις διεργασίες των παραδειγμάτων 8-2 και 8-3.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-4 Δίκτυο ελάχιστης ενέργειας για τη διεργασία του ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ 8-2.

Θέλουμε να βρούμε το ΕΕΚ δίκτυο εναλλακτών θερμότητας για τη διεργασία του Παραδείγματος 8-2. Εφαρμόζουμε τη διαδικασία πρώτα για το άνω τμήμα. Για να εφαρμόσουμε τα κριτήρια επιλογής ζευγών ρευμάτων, συνηθίζεται να γράφουμε τα θερμά και ψυχρά ρεύματα σε φθίνουσα σειρά θερμοχωρητικότητας. Στον παρακάτω πίνακα, εκτός από τις θερμοχωρητικότητες γράφουμε και τα θερμοκρασιακά διαστήματα των ρευμάτων.

Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες		Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες	
Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC_p	Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC_p
150	200	Θ2	0.25	140	230	Ψ2	0.3
150	250	Θ1	0.15	140	180	Ψ1	0.2

Παρατηρούμε ότι τα θερμά και ψυχρά ρεύματα είναι ίσα τον αριθμό, άρα είμαστε εν τάξει με το ένα κριτήριο. Επιλέγουμε τα ζεύγη Θ2-Ψ2 και Θ1-Ψ1 γιατί θα εξασφαλίζουν την τήρηση του περιορισμού για το ΔT όπως έχουμε εξηγήσει, με βάση το δεύτερο κριτήριο περί

Θερμοχωρητικοτήτων. Επιδιώκουμε να εξαντλήσουμε τα θερμικά φορτία:

- Θ2 προσφέρει $0.25 \times (200-150) = 12.5 \text{ MW}$
- Ψ2 παίρνει $0.3 \times (230-140) = 27 \text{ MW}$, άρα εξαντλείται το Θ2 και μένουν τα Θ1, Ψ1, Ψ2
- Θ1 προσφέρει $0.15 \times (250-150) = 15 \text{ MW}$
- Ψ1 παίρνει $0.2 \times (180-140) = 8 \text{ MW}$, άρα εξαντλείται το Ψ1 και μένουν τα Θ1, Ψ2

Αν συνδέσουμε τα Θ1 και Ψ2 θα έχουμε πρόβλημα με το κριτήριο των θερμοχωρητικοτήτων. Κανονικά, πρέπει να διαιρέσουμε το Θ1. Επειδή όμως μπορούμε αν θέλουμε, να τοποθετήσουμε την “απαγορευμένη” σύνδεση Θ1-Ψ2 μακριά από το κρίσιμο σημείο όπου είχαμε πει ότι δεν είναι τόσο “σφιχτοί” οι περιορισμοί για το ΔT και μας φαίνεται πιο απλή λύση, θα το ρισκάρουμε και μετά θα ελέγξουμε αν παραβιάστηκε το ΔT_{\min} . Αν έχει πρόβλημα, τότε θα πάμε “με το σταυρό στο χέρι” και θα διαιρέσουμε το Θ1, αλλιώς μπορούμε να το αφήσω έτσι.

Οπότε, δοκιμάζουμε να διατάξω τις συνδέσεις ανάλογα, δηλαδή στις χαμηλότερες προς το κρίσιμο σημείο θερμοκρασίες, θα έχουμε τον εναλλάκτη Θ2-Ψ2 και στις υψηλότερες τον Θ1-Ψ2. Για να βρούμε το φορτίο στην τελευταία σύνδεση, πρέπει να υπολογίσουμε τις θερμοκρασίες εξόδου των ρευμάτων. Το Θ1 μπορεί να προσφέρει άλλα $15-8 = 7 \text{ MW}$. Το Ψ2 καταλήγει στους $140 + 12.5 / 0.3 = 181.7 \text{ }^\circ\text{C}$. Από εκεί μέχρι τους 230 θα πάρει άλλα $0.3 \times (230-181.7) = 14.5 \text{ MW}$, οπότε εξαντλείται και το υπόλοιπο Θ1 και μένει φορτίο 7.5 MW που θα καλυφθεί από την εξωτερική θερμή παροχή, όπως είχαμε βρει και στο παράδειγμα 8-2.

Όπως είπαμε, επειδή κάναμε μια “παρανομία” με το “απαγορευμένο” ζευγάρι Θ1-Ψ2, πρέπει να ελέγξουμε αν παραβιάστηκε ο περιορισμός για το ΔT . Το Θ1 αρχίζει να αλληλεπιδρά με το Ψ1 σε θερμοκρασία $150 + 8 / 0.15 = 203.3 \text{ }^\circ\text{C}$ που υπερβαίνει τους $181.7 \text{ }^\circ\text{C}$ του Ψ1 με το οποίο έρχεται σε επαφή, κατά 21.6 βαθμούς, άρα δεν υπάρχει πρόβλημα

Στο κάτω τμήμα έχουμε τα δεδομένα του παρακάτω πίνακα:

Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες		Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες	
Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC_p	Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC_p
150	80	Θ2	0.25	140	20	Ψ1	0.2
150	40	Θ1	0.15	140	180	---	---

Εδώ έχουμε λιγότερα ψυχρά από θερμά ρεύματα οπότε και πάλι είμαστε εν τάξει (στο κάτω τμήμα οι ρόλοι αντιστρέφονται!). Εδώ θέλουμε τα θερμά ρεύματα να έχουν μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, οπότε συνδέω το Θ2 με το Ψ1. Εξαντλούμε τα φορτία των ρευμάτων:

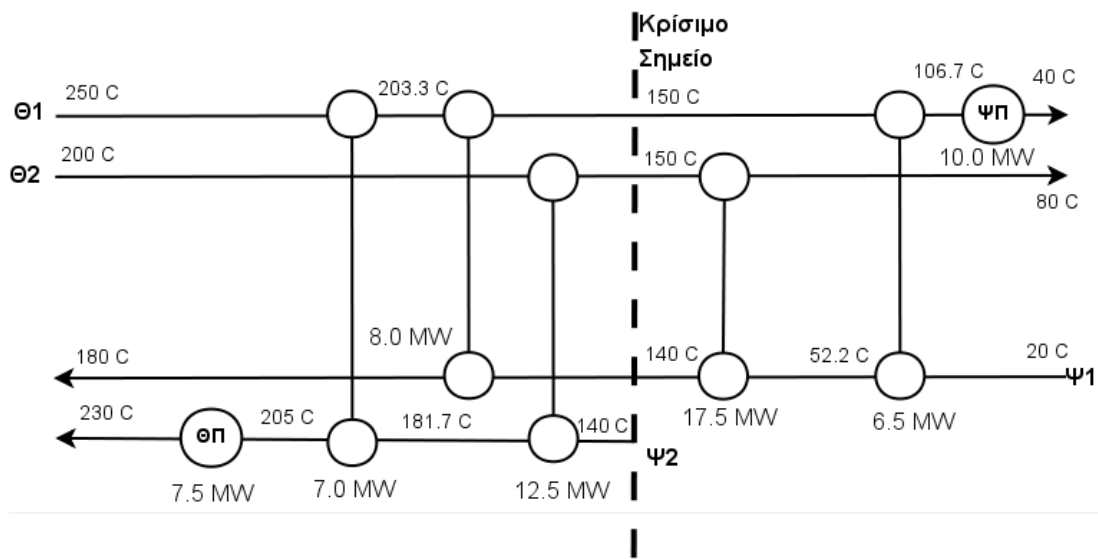
- Θ2 προσφέρει $0.25 \times (150-80) = 17.5 \text{ MW}$
- Ψ1 παίρνει $0.2 \times (140 - 20) = 24 \text{ MW}$, άρα εξαντλείται το Θ2 και μένουν τα Θ1 και Ψ1.

Όπως και πριν, θα σχηματίσουμε το “απαγορευμένο” ζεύγος Θ1-Ψ1 μακριά από το κρίσιμο σημείο, αφήνοντας το “νόμιμο” ζεύγος να αναλάβει το φορτίο στην περιοχή όπου υπάρχουν μικρά περιθώρια για μειώσεις του ΔT . Το Θ1 προσφέρει $0.15 \times (150 - 40) = 16.5 \text{ MW}$, ενώ το Ψ1 καταλήγει σε θερμοκρασία $140 - 17.5 / 0.2 = 52.5 \text{ }^\circ\text{C}$ και από τους 20 μέχρι εκεί θα πάρει άλλα $0.2 \times (52.5 - 20) = 6.5 \text{ MW}$, άρα εξαντλείται και μένει ένα φορτίο 10 MW από το Θ1 που θα το αναλάβει η εξωτερική ψυχρή παροχή, όπως είχαμε βρει και στο παράδειγμα 8-2.

Και πάλι πρέπει να βεβαιωθούμε ότι η ελαστικότητα που δείξαμε με τη χρήση του “απαγορευμένου” ζευγαριού Θ1-Ψ1 δεν παραβίασε τους περιορισμούς για το ΔT . Η θερμοκρασία όπου καταλήγει το Θ1 πριν το αναλάβει η ψυχρή βοηθητική παροχή, είναι $40 + 10 / 0.15 = 106.7 \text{ }^\circ\text{C}$, πολύ πάνω από τους 20 όπου καταλήγει το Ψ1, αλλά ακόμη και από τους $52.5 \text{ }^\circ\text{C}$ όπου αρχίζει

να αλληλεπιδρά με το Θ1. Επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα.

Τα ρεύματα και οι μεταξύ τους συνδέσεις αναπαρίστανται συμβολικά στο σχήμα 8-16, μέσω ενός διαγράμματος “δικτύου” (grid) που συνηθίζεται ως απεικόνιση των δικτύων εναλλακτών.



Σχήμα 8-16 Δίκτυο ΜΕΘ για τη διεργασία των παραδειγμάτων 8-2 και 8-4

Κλείνοντας, καταφέραμε να διατηρήσουμε τον περιορισμό του ΔΤ και τις ελάχιστες αναγκαίες εξωτερικές παροχές, όπως ορίστηκαν βάσει του κρίσιμου σημείου χωρίς να τηρήσουμε επακριβώς τους κανόνες του αλγόριθμου σύνθεσης δικτύων. Συγκεκριμένα, δείξαμε ελαστικότητα όσον αφορά τον κανόνα για το σχηματισμό ζευγαριών με βάση τις θερμοχωρητικότητες, χάρη στα περιθώρια που είχαμε να τα βάλουμε μακριά από το κρίσιμο σημείο. Γενικά, ο κανόνας είναι να ξεκινάμε την τοποθέτηση των εναλλακτών κοντά στο κρίσιμο σημείο και καθώς απομακρυνόμαστε να είμαστε πιο ελαστικοί και να δοκιμάζουμε “μη επιτρεπές” συνδέσεις.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-5 Δίκτυο ΕΕΚ για το ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-3

Τώρα, επιδιώκουμε να βρούμε το δίκτυο εναλλακτών ΕΕΚ για τη διεργασία του παραδείγματος 8-3. Στο άνω τμήμα έχουμε τα εξής δεδομένα:

Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες		Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες	
Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC_p	Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC_p
90	130	Θ1	10	80	130	Ψ2	15
---	---	---	---	80	130	Ψ1	5

Τα θερμά είναι λιγότερα από τα ψυχρά, οπότε είμαστε εν τάξει μέχρι εδώ. Συνδέουμε Θ1 με Ψ2.

- Θ1 προσφέρει $10 \times (130-90) = 400 \text{ kW}$
- Ψ2 παίρνει $15 \times (130-80) = 750 \text{ kW}$

άρα εξαντλείται το Θ1 και μένουν το Ψ1 και το Ψ2. Από αυτά, το Ψ1 θα θερμανθεί εξ ολοκλήρου με μια βοηθητική παροχή ίση με $5 \times (130 - 80) = 250 \text{ kW}$. Το Ψ2 με τη βοήθεια του Θ1 θα φτάσει σε θερμοκρασία $80 + 400/15 = 106.7 \text{ °C}$ και από εκεί θα χρειαστεί μια εξωτερική παροχή θέρμανσης ίση με $15 \times (130 - 106.7) = 350 \text{ kW}$. Το άθροισμα των δύο παροχών είναι 600 kW ,

όπως είχαμε προβλέψει κατά τον υπολογισμό του κρίσιμου σημείου.

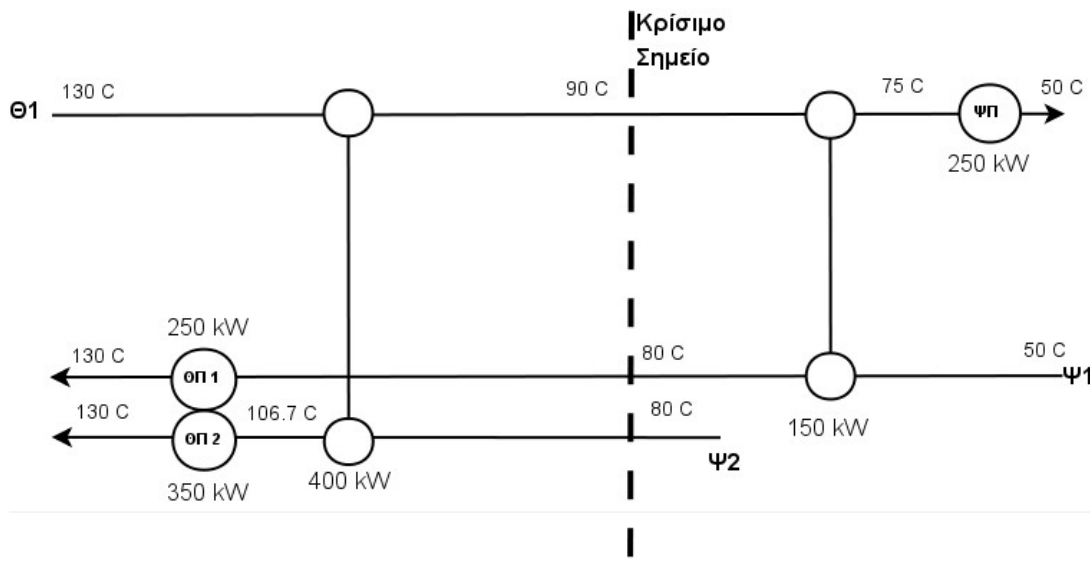
Στο κάτω τμήμα, έχουμε τα εξής δεδομένα:

Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες		Θερμοκρασίες		Θερμοχωρητικότητες	
Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC _P	Pinch	Άκρο	ρεύμα	FC _P
90	50	Θ1	10	80	50	Ψ1	5

Εδώ έχουμε ένα θερμό και ένα ψυχρό ρεύμα με αποδεκτή σχέση μεταξύ θερμοχωρητικοτήτων, οπότε τα συνδέουμε και εξετάζουμε ποιο εξαντλείται:

- Θ1 δίνει $10 \times (90-50) = 400 \text{ kW}$
- Ψ1 παίρνει $5 \times (80-50) = 150 \text{ kW}$

άρα εξαντλείται το Ψ1 και μένει το Θ1 που πρέπει να ψυχθεί μέχρι τους $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Με τη βοήθεια του Ψ1 έχει κατέβει από τους 90 στους $90 - 150/10 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ και από εκεί πρέπει να του αφαιρεθούν $10 \times (75 - 50) = 250 \text{ kW}$, όπως είχαμε υπολογίσει κατά τον προσδιορισμό του κρίσιμου σημείου.



Σχήμα 8-17 Δίκτυο ΜΕΘ για τη διεργασία των παραδειγμάτων 8-3 και 8-5

Στο Σχήμα 8-17 φαίνεται η συμβολική αναπαράσταση του δικτύου εναλλακτών-παροχών. Εδώ δε δείξαμε ελαστικότητα ως προς τους κανόνες γιατί δεν υπήρχε τέτοιο δίλημμα, δηλαδή δε χρειάστηκε ποτέ να χωρίσουμε κανένα ρεύμα.

Τα δίκτυα που πήραμε και στα δύο παραδείγματα είναι τα λεγόμενα δίκτυα ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης (EEK). Αυτό δε σημαίνει ότι έχουν ελάχιστο αριθμό εναλλακτών. Στο παράδειγμα 8-4, έχουμε

- στο άνω τμήμα: $2+2-1 = 3$ στοιχεία κατ' ελάχιστον όπως και βρήκαμε
- στο κάτω τμήμα: $3+2-1 = 4$ στοιχεία κατ' ελάχιστον όπως και βρήκαμε, αλλά
- για το συνολικό δίκτυο: $4+2-1 = 5$ στοιχεία κατ' ελάχιστον, ενώ βρήκαμε 7 (5 εναλλάκτες και 2 βοηθητικές παροχές).

Για το παράδειγμα 8-5 έχουμε

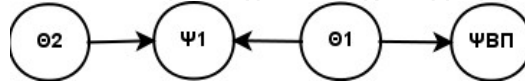
- για το άνω τμήμα, αν θεωρήσουμε ότι οι δύο θερμές παροχές είναι μια που διακλαδίζεται, όπως τα ρεύματα που αλληλεπιδρούν με περισσότερα του ενός άλλα στοιχεία, τότε

έχουμε: $3+1-1 = 3$ κατ' ελάχιστον όπως και βρήκαμε (εναλλακτικά, αν θεωρήσουμε τις παροχές χωριστά, είμαστε στην ειδική περίπτωση με δύο αποκομμένα δίκτυα όπου ισχύει $2+1-1=2$ και $1+1-1 = 1$, σύνολο 3).

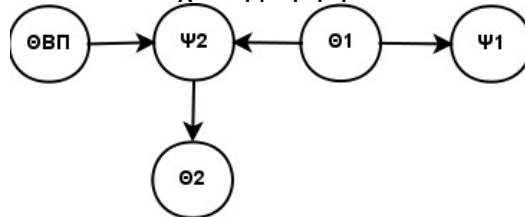
- για το κάτω τμήμα έχουμε $2+1-1 = 2$ κατ' ελάχιστον, όπως και βρήκαμε, αλλά
- για το συνολικό δίκτυο: $3+2$ (μία ψυχρή, μία ενιαία θερμή παροχή) – $1 = 4$, ενώ βρήκαμε 5, ανεξάρτητα αν θεωρήσουμε ότι η θερμή παροχή είναι ενιαία γιατί και πάλι θέλει δύο συσκευές (ή μία της δυναμικότητας των δύο) για να αλληλεπιδράσει με τα δύο ψυχρά ρεύματα.

Πράγματι, αν εξετάσουμε πιο προσεκτικά τις δομές των παραδειγμάτων, θα δούμε τα εξής:

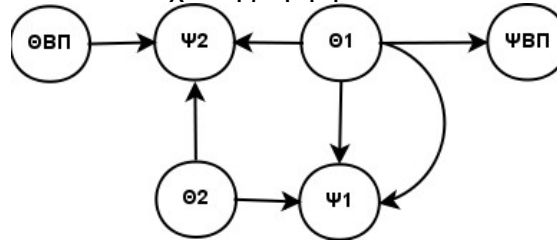
το άνω μέρος του δικτύου στο παράδειγμα 8-4 έχει τη μορφή



το κάτω μέρος του ίδιου δικτύου έχει τη μορφή

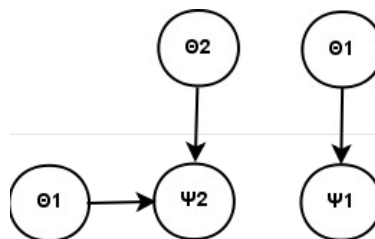


αλλά το δίκτυο στο σύνολό του έχει τη μορφή



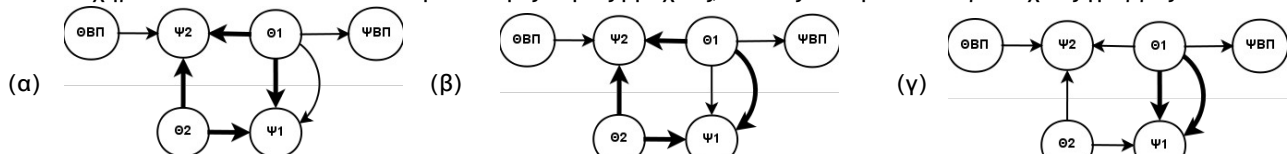
δηλαδή έχει δύο βρόχους¹, πράγμα που διακαίολογεί και το εύρημά μας των δύο μονάδων εναλλαγής περισσότερων από τις ελάχιστες δυνατές.

Για το άνω μέρος του δικτύου στο παράδειγμα 8-5 βρίσκουμε τη μορφή

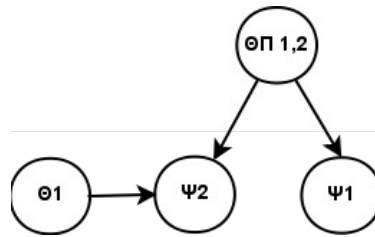


ή, αν θεωρήσουμε μία θερμή παροχή που μοιράζεται σε δύο ρεύματα,

¹ Το σχήμα του κάτω δικτύου του παρ. 8-4 ορίζει τρεις βρόχους, αυτούς που φαίνονται με παχειές γραμμές εδώ:

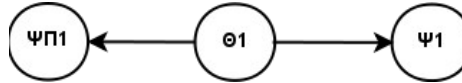


Ωστόσο, αν διώξουμε τον ένα, π.χ. τον (α) καταργώντας τη σύνδεση $\Theta 2-\Psi 2$, απαλοίφουμε και δεύτερο (εν προκειμένω, τον (β)). Έτσι, ένας από τους τρεις βρόχους πλεονάζει. Είναι κάτι ανάλογο με τα διανύσματα όπου ορίζουμε μια βάση γραμμικά ανεξάρτητα στοιχείων και τα υπόλοιπα είναι συνδυασμοί των στοιχείων βάσης.

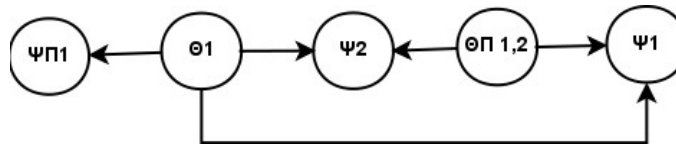


που δίνει και στις δύο παραλλαγές, 3 στοιχεία εναλλαγής.

Για το κάτω μέρος είναι



αλλά για το δίκτυο στο σύνολό του βλέπουμε ότι η συνδεσμολογία είναι κάπως έτσι:



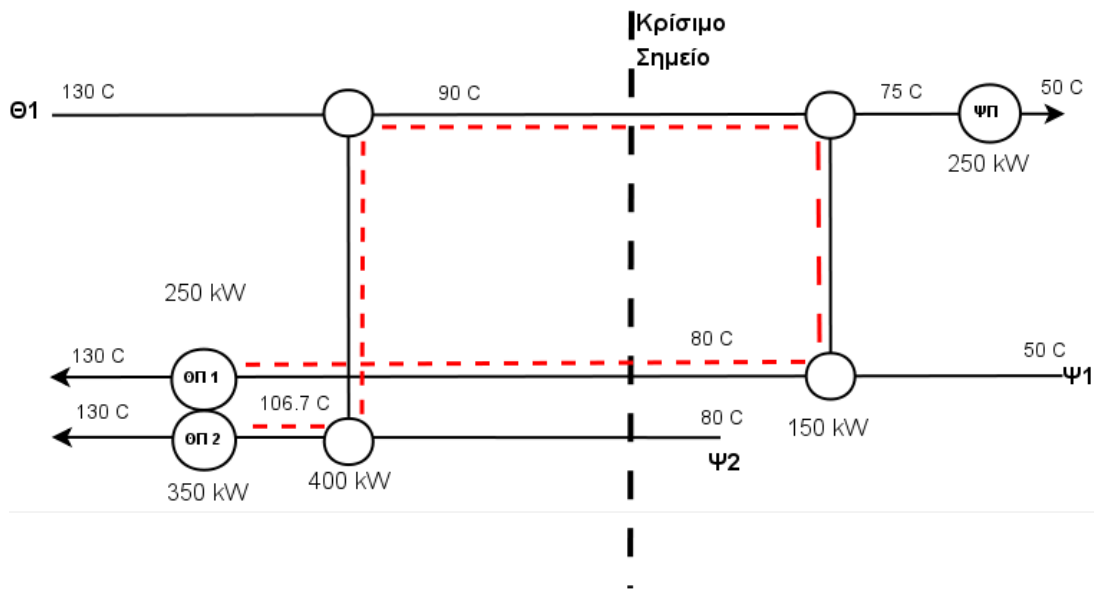
δηλαδή έχουμε ένα βρόχο, σε αντιστοιχία και με το εύρημα ότι οι μονάδες εναλλαγής θερμότητας είναι κατά μία περισσότερες από τις ελάχιστες δυνατές.

Είναι προφανές ότι και στις δύο περιπτώσεις έχουμε συνθέσει δίκτυα ΕΕΚ τα οποία δεν ταυτίζονται με τις λύσεις του ελάχιστου δυνατού αριθμού ΜΕΘ. Η αύξηση του πάγιου κόστους λόγω των περισσότερων εναλλακτών του ΕΕΚ αντισταθμίζει τη μείωση του λειτουργικού κόστους σε σχέση με το δίκτυο των ελάχιστων ΜΕΘ. Δε μπορούμε να γνωρίζουμε με βεβαιότητα αν το ένα από τα δύο ή ακόμη και κάποιο ενδιάμεσο δίκτυο αποτελεί πιο συμφέρουσα λύση, χωρίς αναλυτικό οικονομοτεχνικό υπολογισμό. Κλείνουμε την παρούσα ενότητα, δείχνοντας τη διαδικασία ελάττωσης του αριθμού ΜΕΘ και την οικονομική αξιολόγηση των δύο λύσεων για την περίπτωση του δικτύου του παραδείγματος 8-5 που είναι απλούστερο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-6 Ελάττωση αριθμού ΜΕΘ σε σχέση με το ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-5.

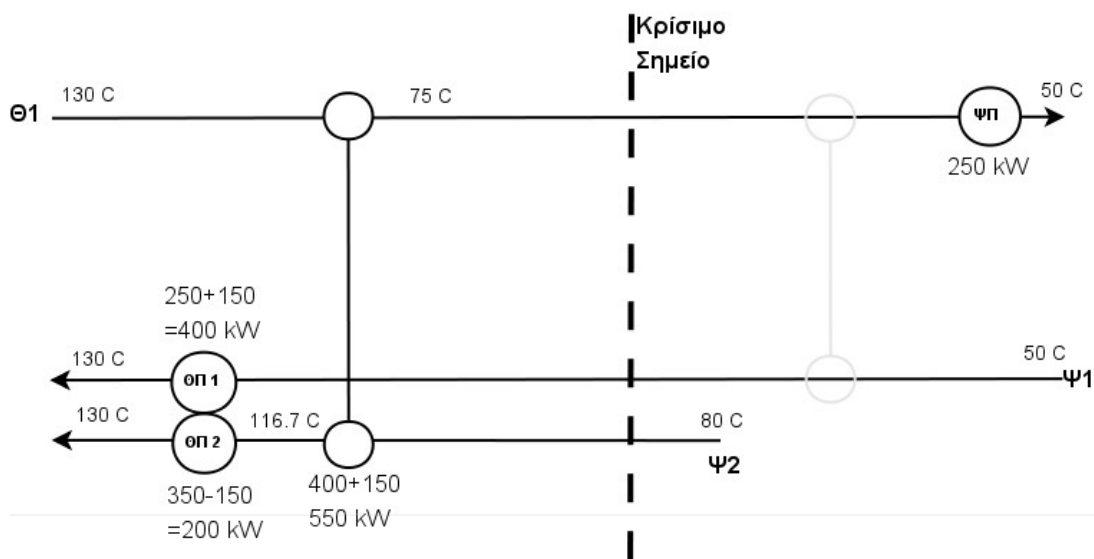
Όπως διαπιστώσαμε, το δίκτυο του παραδείγματος 8-5 έχει μία πλεονάζουσα ΜΕΘ σε σχέση με τις ελάχιστες δυνατές. Αυτή δε μπορεί παρά να βρίσκεται στο μοναδικό βρόχο κι αυτό είναι γενική αρχή γιατί αν αφαιρέσουμε σύνδεση που σχηματίζει ανοιχτή αλυσίδα και όχι βρόχο, θα διασπάσουμε το δίκτυο σε δύο ασύνδετα τμήματα. Άρα, θέλουμε να σπάσουμε το βρόχο και θα το κάνουμε απομακρύνοντας το μικρότερο ενεργειακό φορτίο ώστε να επιφέρουμε τη μικρότερη δυνατή διαταραχή στον ενεργειακά άριστο σχεδιασμό που έχουμε κάνει. Ο βρόχος του δικτύου φαίνεται με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές στο σχήμα 8-17 και το μικρότερο φορτίο σε αυτόν είναι τα 150 kW από την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ Θ1 και Ψ1.

Εκμεταλλευόμαστε την αρχή διατήρησης της ενέργειας εφαρμοσμένη στο βρόχο, που σημαίνει ότι ένα θερμικό φορτίο μπορούμε να το πάρουμε από μια μονάδα στη διπλανή της και να το μεταφέρουμε γύρω-γύρω στο βρόχο. Αυτό διατηρεί τα σωστά θερμικά φορτία κάθε ρεύματος γιατί η μετακίνηση δεν τα οδηγεί σε ανοιχτό άκρο, αλλά στο τέλος πρέπει να θυμηθούμε να κάνουμε έλεγχο για τυχόν παραβίαση του ΔΤ από τη νέα κατάσταση. Αν υπάρχει τέτοιο θέμα, θα μεταβάλλουμε κατάλληλα κάποιο φορτίο και θα μεταφέρουμε τη διαφορά με κατάλληλο πρόσημο στις θερμές και ψυχρές παροχές. Αν το φορτίο που μεταφέρουμε σε ένα βρόχο είναι ίσο με αυτό μιας μονάδας του βρόχου, τότε αυτή, με τη μετακίνηση του φορτίου της, καταργείται.



Σχήμα 8-18 Κλειστός βρόχος στο δίκτυο ΜΕΘ του παραδείγματος 8-5

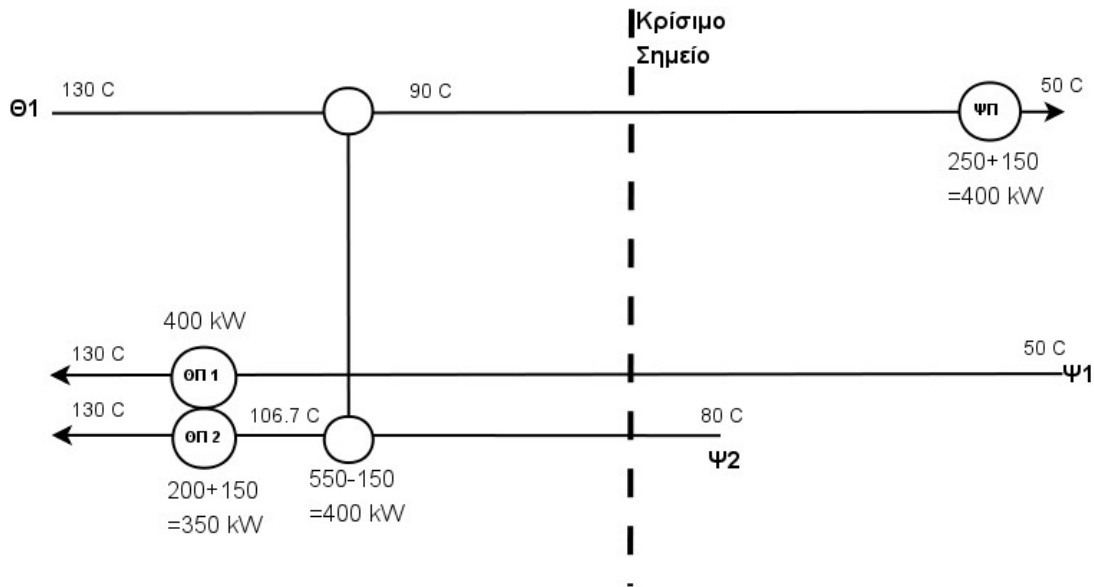
Στο παράδειγμά μας, αν καταργήσουμε την εναλλαγή των 150 kW του Θ1 με το Ψ1, αυτό το ποσό θα πρέπει να προσθαφαιρεθεί κατάλληλα για να μη διαταραχθεί το ενεργειακό ισοζύγιο του βρόχου. Η ενέργεια που πρόσφερε το Θ1 στα δύο ψυχρά, τώρα θα συγκεντρωθεί όλη στο ένα, το Ψ2 που θα δέχεται 400+150 kW. Αλλά τότε πρέπει να μειωθεί ισόποσα η θερμή παροχή ΘΠ2 στα 350-150 = 200 kW, για να μην υπερθερμανθεί το Ψ2. Συγχρόνως, πρέπει να αυξηθεί ισόποσα η ΘΠ1 στα 250+150 = 400 kW για να θερμάνουμε το ρεύμα Ψ1 στη θερμοκρασία στόχο, τώρα που καταργήσαμε τα 150 kW που έπαιρνε από το Θ1. Η εικόνα που διαμορφώνεται φαίνεται στο επόμενο σχήμα, 8-19.



Σχήμα 8-19 Κατάργηση μίας ΜΕΘ και μεταφορά αντίστοιχου θερμικού φορτίου.

Μετά από αυτές τις αλλαγές για τη διατήρηση του ενεργειακού ισοζυγίου, πρέπει να ελέγξουμε και τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή αν τηρούνται ή παραβιάζονται οι περιορισμοί για το ΔT . Από τα δύο τελευταία σχήματα και τη μεταξύ τους σύγκριση καταλαβαίνουμε αμέσως, χωρίς να χρειάζεται υπολογισμός ότι η άμεση συνέπεια για το Θ1 είναι να πέφτει η θερμοκρασία του απευθείας στους 75 βαθμούς μετά από την εναλλαγή θερμότητας με το Ψ2, αντί για 90 όπου έφτανε πριν. Αλλά το Ψ2 βρίσκεται στους 80 βαθμούς οπότε η εναλλαγή δεν είναι εφικτή. Για να γίνει εφικτή και να τηρείται ο περιορισμός των 10 βαθμών για το ΔT , πρέπει να ανεβάσουμε τη

θερμοκρασία του Θ1 στην επίμαχη περιοχή κατά 15 βαθμούς (όσο έπεσε). Αμέσως καταλαβαίνουμε ότι αυτά τα 150 kW που προσθέσαμε στη σύνδεση Θ1-Ψ2 καλύτερα να φύγουν από εκεί και να τα πάμε κάπου αλλού ώστε να μη χάσουμε το στόχο των τελικών θερμοκρασιών. Η εναλλακτική λύση που μένει (και τώρα δεν υπάρχει βρόχος για να ανησυχούμε για το ισοζύγιο του) είναι να ξαναφέρουμε το φορτίο του εναλλάκτη Θ1-Ψ2 στα 400 kW και να πάμε τα 150 kW που είχαμε μεταφέρει εκεί, στην ψυχρή παροχή ώστε και η σωστή ΔΤ να υπάρχει και η τελική θερμοκρασία του Θ1 να επιτυγχάνεται. Μένει μια τελευταία εκκρεμότητα: με το αυξημένο φορτίο Θ1-Ψ2, το Ψ2 έφτανε στους 116.7 °C και από εκεί έφταναν 200 kW της θερμής παροχής για να φτάσει ως τους 130 °C. Τώρα, φτάνει, όπως και πρώτα, μόνο στους 106.7 °C και επομένως πρέπει να αυξήσουμε τη θερμή παροχή ΘΠ1 ανάλογα, ή μάλλον, να την επαναφέρουμε στην αρχική τιμή της, των 350 kW. Η τελική εικόνα είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 8-20 Τακτοποίηση θερμικών φορτίων για επαναφορά σωστού ΔΤ.

Σημειώνουμε ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το δίκτυο ήταν αρκετά απλό ώστε να παρακάμψουμε την παραπάνω διαδικασία της μετακίνησης φορτίων στο εσωτερικό του βρόχου και της διόρθωσης για διατήρηση του ελάχιστου ΔΤ. Θα μπορούσαμε πιο απλά να είχαμε κάνει το εξής:

- Κατάργηση του Θ1-Ψ1
- μεταφορά των 150 kW που παραλάμβανε το Ψ1 στην παροχή ΘΠ1 ώστε το Ψ1 να φτάσει στη θερμοκρασία-στόχο
- μεταφορά των 150 kW που έχανε το Θ1 στην παροχή ΨΠ1 ώστε το Θ1 να φτάσει στη θερμοκρασία στόχο

Το δίκτυο είναι τέτοιο που οι παραπάνω αλλαγές δε θα πείραζαν τη ΔΤ στη μοναδική εναλλαγή ρευμάτων που απέμενε, τη Θ1-Ψ2. Αυτό δεν ισχύει πάντα και η διαδικασία που ακολουθήσαμε προηγουμένως είναι πιο γενική και χειρίζεται περιπτώσεις όπου έχουμε πρόβλημα με τη ΔΤ στη νέα διαμόρφωση. Θα εξετάσουμε αυτό το θέμα στο επόμενο και τελευταίο παράδειγμα, αφού πρώτα κάνουμε ένα σχόλιο για το πώς ολοκληρώνεται η διαδικασία αριστοποίησης με την οριστική επιλογή δικτύου μεταξύ του ΕΕΚ, του απλοποιημένου με τις ελάχιστες μονάδες και τυχόν ενδιάμεσων λύσεων.

Στα Σχήματα 8-17 και 8-20, έχουμε καταλήξει με δύο αριστοποιημένα δίκτυα εναλλακτών για την αρχική διεργασία. Ένα που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας (παράδειγμα 8-3) και

ένα που ελαχιστοποιεί τις ΜΕΘ. Ποιο να διαλέξουμε; Μπορούμε να αποφασίσουμε με βάση το οικονομικό κριτήριο: ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας. Αυτό, όπως ξέρουμε, περιλαμβάνει τις αποσβέσεις για τον πάγιο εξοπλισμό (εξαρτάται από τον αριθμό των ΜΕΘ) και τα λειτουργικά έξοδα (εξαρτάται από το κόστος ενέργειας). Η διαδικασία είναι πολύ απλή: δεν έχουμε παρά να βρούμε το συνολικό κόστος για κάθε λύση και να επιλέξουμε την οικονομικότερη.

Το ετήσιο κόστος είναι το άθροισμα των ετήσιων αποσβέσεων και του κόστους ενέργειας:

$$OC = D + C_E \quad (8-5)$$

Οι αποσβέσεις D συνήθως δίνονται ως ποσοστό του πάγιου κόστους (γραμμική απόσβεση). Το ποσοστό αυτό είναι ο συντελεστής απόσβεσης e που βρίσκεται ως το αντίστροφο της διάρκειας του επενδυτικού σχεδίου (υποθέτοντας ότι στο τέλος ο εξοπλισμός έχει απαξιωθεί πλήρως).

$$D = e C \quad (8-6)$$

Το πάγιο κόστος C για τους εναλλάκτες δίνεται ως συνάρτηση της επιφάνειας εναλλαγής. Όπως έχουμε πει σε προηγούμενες ενότητες, η συσχέτιση είναι της μορφής

$$C = A^n \quad (8-7)$$

όπου A η επιφάνεια και n ένας εκθέτης με συνήθεις τιμές μεταξύ 0.55 και 0.8. Η επιφάνεια βρίσκεται από τη σχέση

$$A = Q / U \Delta T_L \quad (8-8)$$

όπου Q το θερμικό φορτίο του εναλλάκτη, U ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της συσκευής και ΔT_L η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας.

$$\Delta T_L = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2) \quad (8-9)$$

όπου ΔT_1 , ΔT_2 = θερμοκρασιακές διαφορές στα άκρα του εναλλάκτη. Τα πάγια κόστη αυτού του είδους αθροίζονται πάνω σε όλους τους εναλλάκτες.

Το κόστος ενέργειας δίνεται από

$$C_E = Q C_Q t \quad (8-10)$$

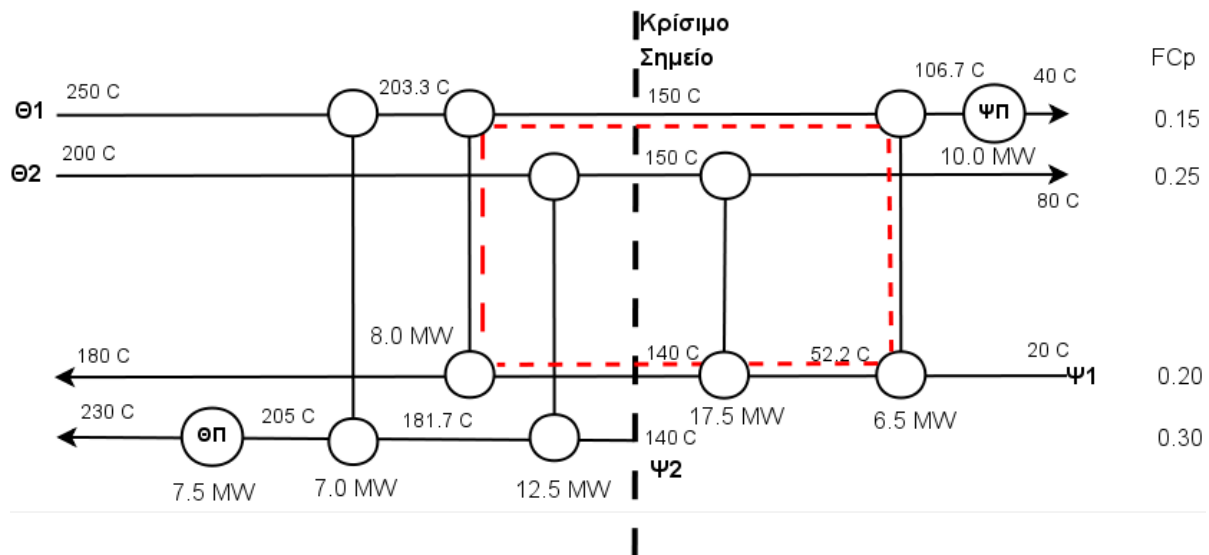
όπου Q το θερμικό φορτίο (σε μονάδες ισχύος), C_Q το κόστος της μονάδας ενέργειας και t ο χρόνος λειτουργίας. Το κόστος C_Q υπολογίζεται ως εξής:

- Για ψύξη, ως $K / (C_p \Delta T)$, όπου ΔT η μεταβολή θερμοκρασίας του ψυκτικού και C_p η θερμοχωρητικότητα αυτού
- Για θέρμανση με κορεσμένο ατμό, ως $K / \Delta H =$ κόστος ρευστού / ενθαλπία συμπύκνωσης.
- κλπ, ανάλογα με την κατάσταση του ψυκτικού μέσου.
- Τα κόστη της ενέργειας αθροίζονται πάνω σε όλες τις παροχές του δικτύου.

Τα αθροιζόμενα κόστη των αποσβέσεων και των παροχών δίνουν την αντικειμενική συνάρτηση για το εκάστοτε θεωρούμενο δίκτυο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-7 Ελάττωση αριθμού ΜΕΘ σε σχέση με το ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8-4.

Στο τελευταίο παράδειγμα θα εξετάσουμε το δίκτυο των παραδειγμάτων 8-2 και 8-4 που είναι πιο πολύπλοκο επειδή έχει δύο βρόχους. Θα ξεκινήσουμε από την εξάλειψη του πιο απλού βρόχου που εικονίζεται με τη διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στο σχήμα 8-21.

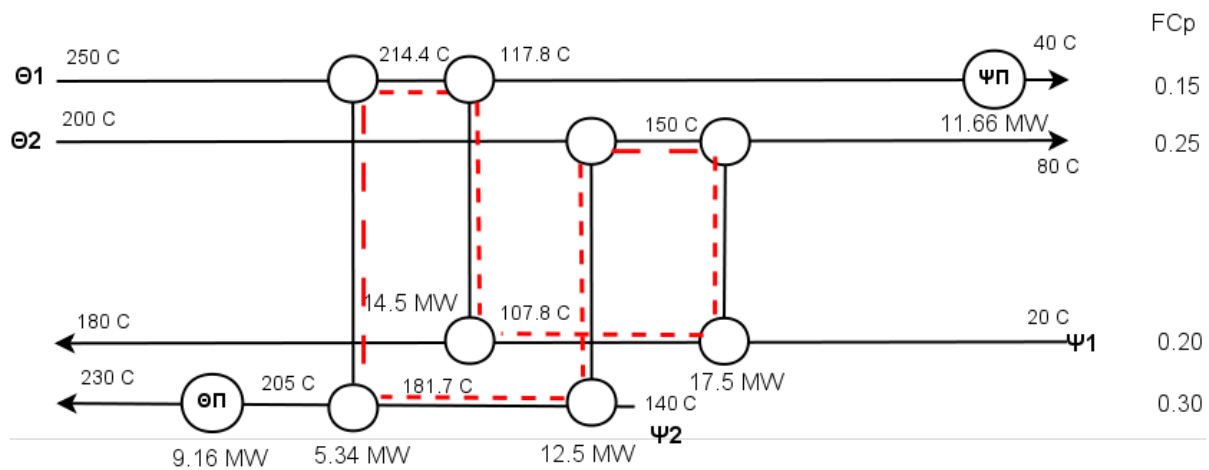


Σχήμα 8-21 Πρώτος κλειστός βρόχος στο δίκτυο ΜΕΘ του παραδείγματος 8-4

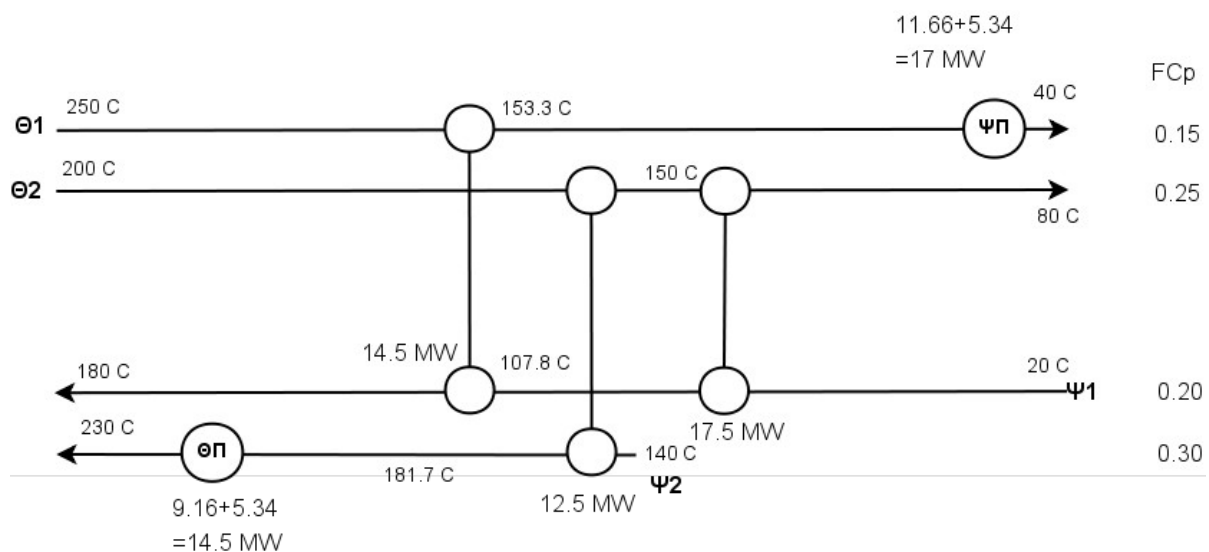
Το μικρότερο φορτίο είναι στη δεξιά σύνδεση Θ1-Ψ1. Αν το καταργήσουμε, τότε θα πάει στην αριστερή σύνδεση μεταξύ των δύο ρευμάτων που θα γίνει $8+6.5 = 14.5$ MW. Αυτός είναι πολύ απλός βρόχος οπότε τελειώσαμε και πρέπει να ελέγξουμε αν παραβιάσαμε τη ΔT_{\min} . Πρώτα, βρίσκουμε τις νέες θερμοκρασίες των ρευμάτων εκεί όπου έρχονται σε επαφή. Με το “σβήσιμο” των 6.5 MW από δεξιά, η αύξηση του Ψ1 από τους 20 στους 52.2 °C καταργείται και αυτό αντί για τους 140 φτάνει στους $140 - (52.2 - 20) = 107.8$ °C. Αντίστοιχα, το Θ1 φτάνει κατευθείαν στη θερμοκρασία των 106.7 βαθμών που έχει μόλις πριν από την ψυχρή παροχή στο τέλος του, δηλαδή έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από το Θ1 στην περιοχή όπου συναντώνται θερμικά και δε μπορεί να του μεταφέρει ενέργεια. Πρέπει να το θερμάνουμε. Θα το πάμε στους $107.8 + 10 = 117.8$ °C για να επαναφέρουμε τη σωστή ΔT . Ο μόνος τρόπος για να μη χαλάσουμε ο,τι φτιάξαμε είναι να πάμε ακόμη πιο πίσω, στη σύνδεση Θ1-Ψ2 και να μειώσουμε κατά ένα ποσό X τη θερμότητα των 7 MW που προσφέρει στο Ψ2 (θα την υπολογίσουμε). Τότε, το μεν Ψ2 πρέπει να θερμανθεί κατά X επιπλέον από την ΘΠ για να φτάσει στη θερμοκρασία-στόχο, το δε Θ1 πρέπει να ψυχθεί επίσης κατά X επιπλέον από την ΨΠ, για να φτάσει κι αυτό στη σωστή θερμοκρασία. Το X βρίσκεται με πολλούς τρόπους. Εδώ το βρίσκουμε με τη διαφορά της τωρινής και επιθυμητής θερμοκρασίας και της θερμοχωρητικότητας των 0.15 MW/K.

$$X = (117.8 - 106.7) \times 0.15 = 1.66 \text{ MW}$$

Η τελική κατάσταση με την απαλοιφή του πρώτου βρόχου και την τακτοποίηση των φορτίων φαίνεται στο σχήμα 8-22 (υπάρχουν μικρά σφάλματα στρογγύλευσης σε ορισμένες θερμοκρασίες). Επίσης, φαίνεται και ο δεύτερος βρόχος που είναι αρκετά πιο σύνθετος από τον πρώτο. Ωστόσο, παρατηρούμε την ευτυχή σύμπτωση του να έχει ένα θερμό ρεύμα, το Θ1, απευθείας συνδεδεμένο με τη ψυχρή παροχή κι ένα ψυχρό, το Ψ2 απευθείας συνδεδεμένο με τη θερμή παροχή. Το καλό με τις ανοιχτές διαδρομές με βοηθητικές παροχές στα άκρα τους είναι ότι μπορούμε να “φορτώσουμε” εκεί ο,τι περισσεύει από τις μετακινήσεις φορτίων που θέλουμε να κάνουμε, χωρίς να πειράξουμε άλλα ρεύματα που δεν πρέπει. Και να πώς ωφελεί η συγκεκριμένη παρατήρησή μας: το ελάχιστο φορτίο του βρόχου είναι τα 5.34 MW στη σύνδεση Θ1-Ψ2. Αν το αφαιρέσουμε, το Θ1 θα πάει πιο θερμό στην επόμενη σύνδεση (Θ1-Ψ1) που δεν την πειράζουμε και μετά στην ψυχρή παροχή που αυξάνουμε κατά τα 5.34 MW που λείπουν για να έρθει στη σωστή τελική θερμοκρασία. Όσο για το Ψ2, αυτό έρχεται πιο ψυχρό στη θερμή παροχή, που άρα αυξάνουμε κατά 5.34 MW ώστε κι αυτό να έχει τη σωστή τελική θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 8-23.



Σχήμα 8-22 Απαλοιφή του πρώτου βρόχου, τακτοποίηση των φορτίων και δεύτερος βρόχος.



Σχήμα 8-23 Απαλοιφή του δεύτερου βρόχου

Η ελάχιστη ΔT που παρατηρείται είναι δεξιά από τη $\Theta 2-\Psi 2$ και είναι 10 βαθμοί γιατί πρόκειται για το αρχικό κρίσιμο σημείο που δεν πειράξαμε. Ωστόσο, με τον τρόπο αυτό αυξήσαμε τις εξωτερικές παροχές και το αντίστοιχο λειτουργικό κόστος. Μήπως υπάρχει τρόπος να διώξουμε τη μία παροχή χωρίς να αυξήσουμε τόσο το λειτουργικό κόστος; Θα δούμε πώς διαμορφώνεται το δίκτυο όταν πάμε κανονικά με την κυκλική μεταφορά των φορτίων μέσα στο βρόχο. Με αναφορά στο σχήμα 8-22, πάμε ως εξής: διώχνουμε τη σύνδεση $\Theta 1-\Psi 2$ και αυξάνουμε κατά το αντίστοιχο ποσό την $\Theta 1-\Psi 1$ ($14.5 + 5.34 = 19.84$ MW). Για να εξισορροπήσουμε το $\Psi 2$ μειώνουμε αναλόγως την $\Theta 2-\Psi 1$ ($17.5 - 5.34 = 12.16$). Τότε, για να τακτοποιήσουμε το $\Theta 2$ πρέπει να αυξήσουμε αναλόγως τη $\Theta 2-\Psi 2$ ($12.5 + 5.34 = 17.84$) και αυτό τακτοποιεί συγχρόνως και το $\Psi 2$ επειδή επαναφέρει τα χαμένα 5.34 MW.

Τώρα, πρέπει να ελέγξουμε τις θερμοκρασίες. Μετά από σχετικούς υπολογισμούς θα διαπιστώσουμε ότι το $\Theta 2$ μετά από τη σύνδεση $\Theta 2-\Psi 2$ έχει πέσει στους 128.6 βαθμούς έναντι των 140 του $\Psi 2$ και πρέπει να πάρει πίσω τα 5.34 για να έρθει στους 150 °C. Τότε, το μεν $\Psi 2$ θα χρειαστεί 5.34 MW στη θερμή παροχή, τα δε άλλα, ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία από πριν, βλέπουμε ότι επανέρχονται στα προηγούμενα φορτία τους και τελικά το ποσόν καταλήγει στη θερμή παροχή, δηλαδή το ίδιο που βρήκαμε πριν έχοντας προσέξει το "άνοιγμα" του βρόχου

προς τις εξωτερικές παροχές. Συμπερασματικά, η μέθοδος της μετατόπισης των φορτίων στους κυκλικούς βρόχους δίνει το σωστό αποτέλεσμα, αλλά με προσεκτική παρατήρηση μπορεί να βρούμε τρόπους για να συντομέψουμε τη διαδικασία της απλοποίησης του δικτύου.

Κλείνοντας, έχουμε καταλήξει σε τρεις διαφορετικές λύσεις για τη διεργασία που πρωτοσυναντήσαμε στο παράδειγμα 2, σχήμα 8-3, και συγκεκριμένα αυτές που φαίνονται στα σχήματα 8-16 (EEK), 8-22 και 8-23 (ελάχιστος αριθμός ΜΕΘ). Παρατηρούμε ότι όσο μειώνουμε τις ΜΕΘ πρέπει να αυξάνουμε τις εξωτερικές παροχές. Κρατάμε και τις τρεις λύσεις για να τις αξιολογήσουμε οικονομικά όπως εξηγήσαμε στο προηγούμενο παράδειγμα και επιλέγουμε την οικονομικότερη. Βέβαια, στην επόμενη ενότητα θα δούμε ότι εκτός από το οικονομικό, υπάρχουν και άλλα κριτήρια, και συγκεκριμένα περιβαλλοντικά, όσον αφορά τη χρήση των βοηθητικών παροχών: η οικονομικότερη χρήση της ενέργειας συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές προϊόντων καύσης για την παραγωγή θερμότητας, αλλά οι περισσότεροι εναλλάκτες συνεπάγονται απόβλητα διεργασιών αποσκλήρυνσης και αφαλάτωσης του νερού ψύξης/θέρμανσης, αλλά και περισσότερα χημικά καθαρισμού κατά περιόδους. Αυτά τα στοιχεία πρέπει να σταθμιστούν πριν ληφθεί η τελική απόφαση.

