Lezioni di Ricerca Operativa

Università degli Studi di Salerno

Lezione n° 19-20

- Problema del trasporto

R. Cerulli – F. Carrabs

Problema del flusso a costo minimo: Formulazione

$$\min \sum_{(i,j)\in A} c_{ij} x_{ij}$$

$$\sum_{j\in FS(i)} x_{ij} - \sum_{k\in BS(i)} x_{ki} = b_i \qquad i = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad \forall (i,j) \in A$$

x_{ij} = **quantità di flusso** che transita sull'arco (i,j)

c_{ij} = **costo** di trasporto di una unità di flusso sull'arco (i,j)

b_i = valore intero associato al nodo *i* (ne definisce il **ruolo** nel problema):

$b_i > 0$: nodo di offerta

$b_i < 0$: nodo di domanda

$b_i = 0$: nodo di passaggio

Problema del Flusso a Costo Minimo: Formulazione

In forma matriciale:

$$\min \underline{c}^T \underline{x}$$
$$A\underline{x} = \underline{b}$$
$$\underline{x} \geq \underline{0}$$

Osservazioni:

1. La matrice A è la matrice di incidenza nodo-arco con dimensione **n*x*m**. Ogni colonna $\underline{a}_{ij}$ è associata all'arco (i,j), ed in particolare abbiamo che: $\underline{a}_{ij} = \underline{e}_i - \underline{e}_j$

($\underline{e}_i$ vettore colonna con tutti 0 eccetto un 1 nella posizione i-ma)

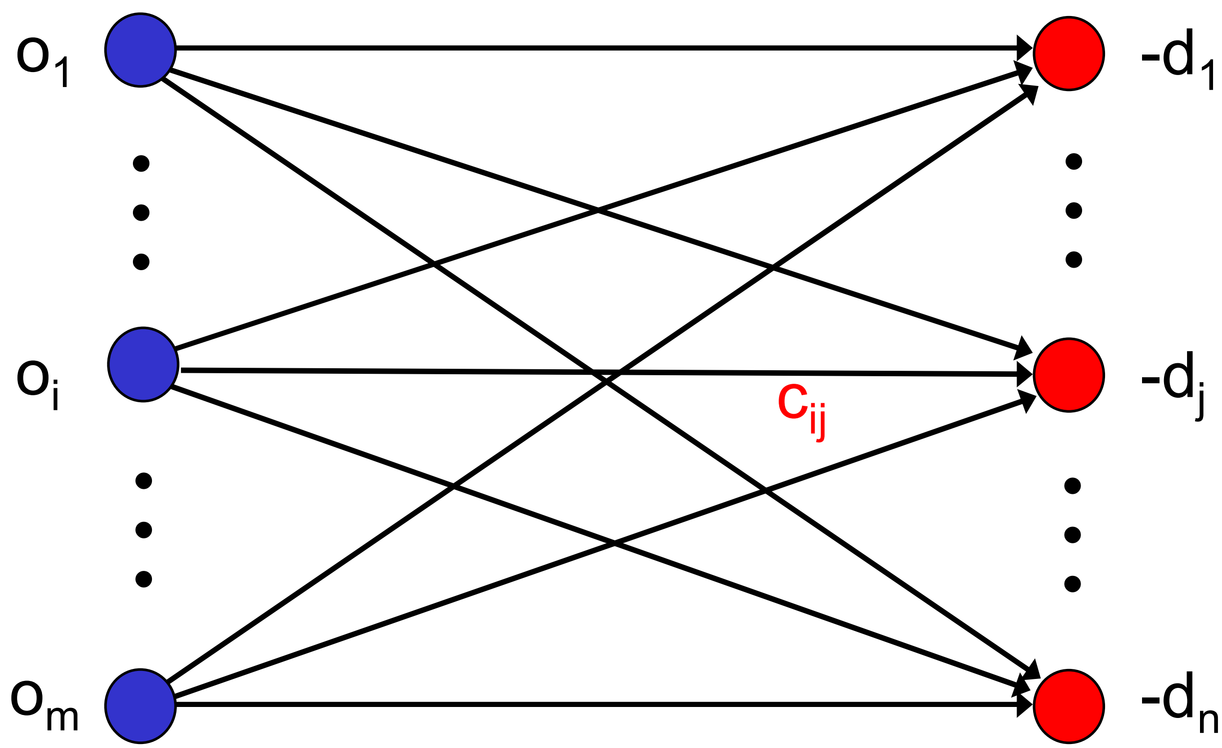
2. Il rango di questa matrice è: **r(A) = n - 1**

Un particolare problema di flusso a costo minimo: Il Problema del Trasporto

- m fornitori producono $o_1,\dots,o_m$ quantità di un certo prodotto
- n clienti richiedono $d_1,\dots,d_n$ quantità di prodotto
- il prodotto può essere trasportato da ogni fornitore ad ogni cliente
- Il grafo sottostante è un grafo bipartito dove i nodi origine (fornitori) hanno solo archi uscenti ed i nodi destinazione (clienti) hanno solo archi entranti.
- Ad ogni arco (i,j) è associato un costo c_{ij} positivo.

Problema del Trasporto: Obiettivo

Determinare la quantità di merce da trasportare su ogni arco *(i,j)* (fornitore-cliente) affinchè ogni fornitore *i* invii la merce o_i prodotta, ogni cliente *j* riceva la quantità d_j richiesta ed il costo complessivo di trasporto sia minimizzato.



Il problema del trasporto: Formulazione

Le variabili:

$$x_{ij} \geq 0 \qquad i = 1, \dots, m\,;\ j = 1, \dots, n$$

la quantità di prodotto trasportata sull'arco (i,j). Sono variabili continue e non negative.

La funzione obiettivo:

il costo del trasporto complessivo

$$\min \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}$$

Il problema del trasporto: Formulazione

I vincoli:

- la quantità totale di prodotto fornita da ciascun fornitore deve essere uguale alla disponibilità del fornitore stesso

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} - 0 = o_i \quad i = 1, \dots, m \qquad (1)$$

- la quantità totale di prodotto ricevuta da ciascun cliente deve essere uguale a quella richiesta

$$0 - \sum_{i=1}^{m} x_{ij} = -d_j \quad j = 1, \dots, n \qquad (2)$$

Il problema del trasporto: Formulazione

$$\min \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} - 0 = o_i \qquad i = 1, \dots, m \qquad (1)$$

$$0 - \sum_{i=1}^{m} x_{ij} = -d_j \qquad j = 1, \dots, n \qquad (2)$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad i = 1, \dots, m \; ; \; j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Ipotesi di ammissibilità (condizioni di bilanciamento)

Affinchè il problema possa ammettere una soluzione deve essere verificata la seguente condizione sui dati:

$$\sum_{i=1}^{m} o_i - \sum_{j=1}^{n} d_j = 0$$

ossia, la quantità totale di prodotto disponibile deve essere uguale alla richiesta totale del prodotto stesso.

Esistenza di una soluzione ammissibile

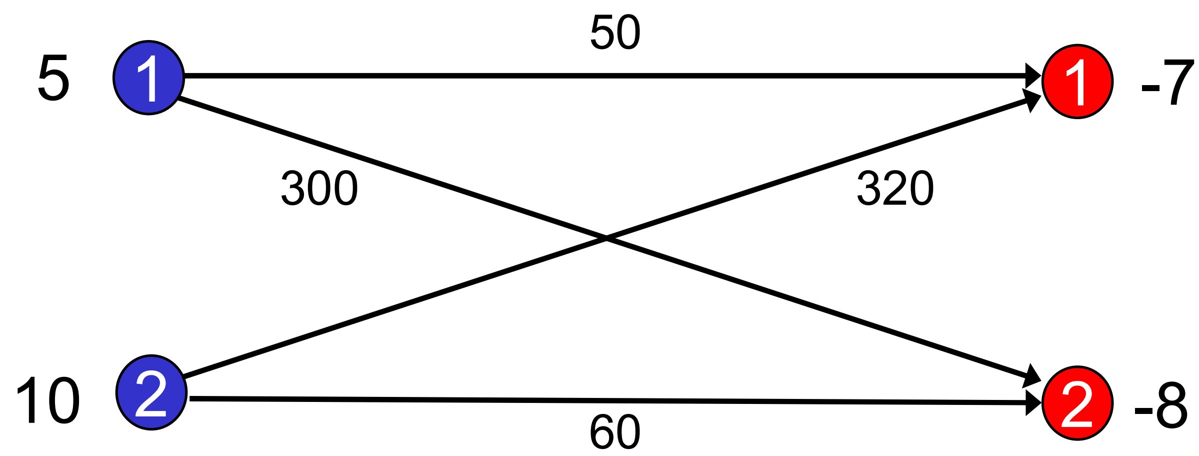
Sia $x_{ij} = \frac{o_i d_j}{\Delta}$ $con\ \ i = 1, \dots, m\ ; j = 1, \dots, n$ e $\Delta = \sum_{i=1}^{m} o_i = \sum_{j=1}^{n} d_j$

Vogliamo dimostrare che la precedente soluzione è ammissibile per il problema del trasporto.
Per farlo bisogna dimostrare che i vincoli del problema siano soddisfatti.

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = \sum_{j=1}^{n} \frac{o_i d_j}{\Delta} = \frac{o_i}{\Delta} \sum_{j=1}^{n} d_j = \frac{o_i}{\Delta} \Delta = o_i$$

$$-\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = -\sum_{i=1}^{m} \frac{o_i d_j}{\Delta} = -\frac{d_j}{\Delta} \sum_{i=1}^{m} o_i = -\frac{d_j}{\Delta} \Delta = -d_j$$

Problema del Trasporto: Esempio

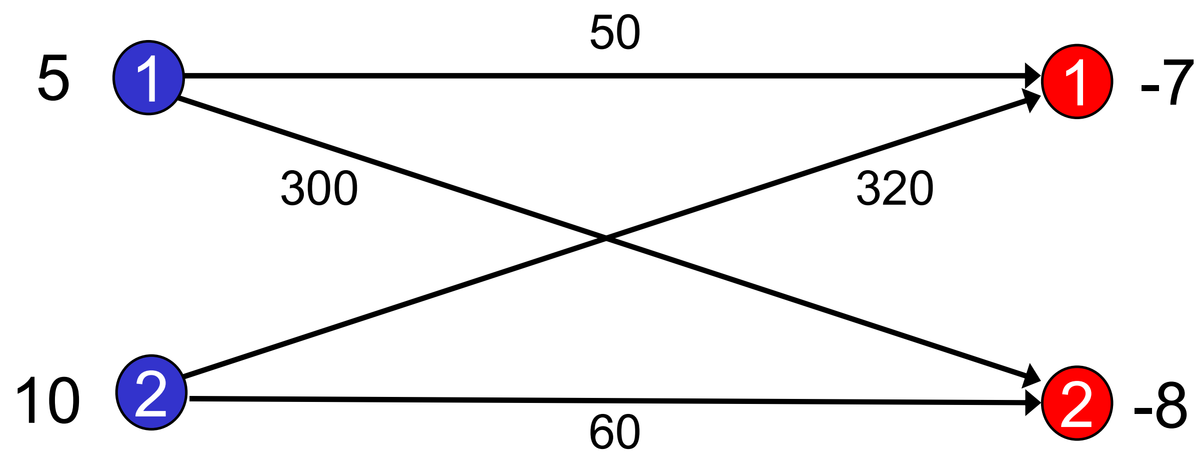


Soluzione ottima: x_{11}=5, x_{12}=0, x_{21}=2, x_{22}=8 con z*=1370

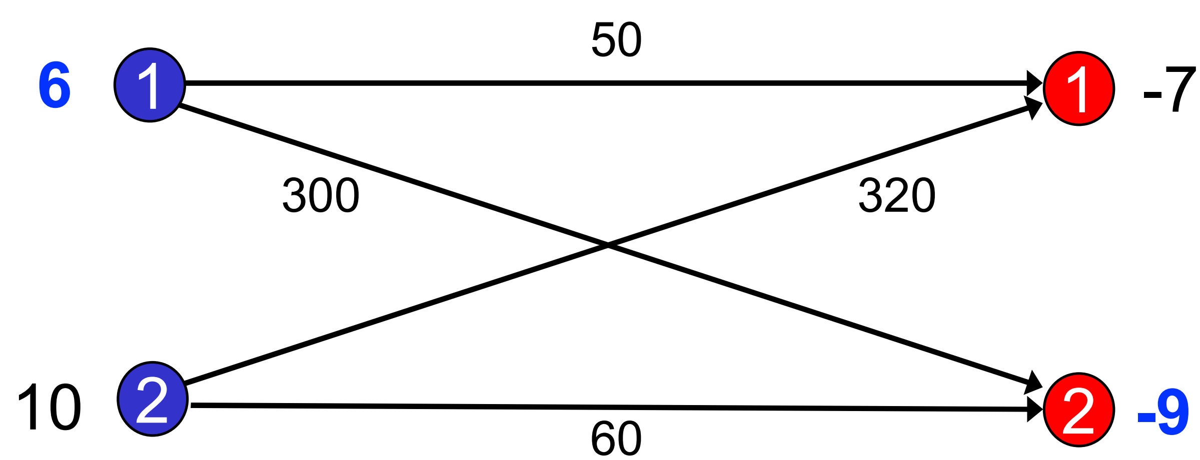
A partire dal valore ottimo z^* appena calcolato, è possible che, aumentando la domanda e l'offerta (di una stessa quantità), il nuovo valore ottimo z_1^* sia minore di z^*?

In alcuni casi è possibile!!!

Il Paradosso del Trasporto



Soluzione ottima: $x_{11}=5$, $x_{12}=0$, $x_{21}=2$, $x_{22}=8$ con $z^*=1370$

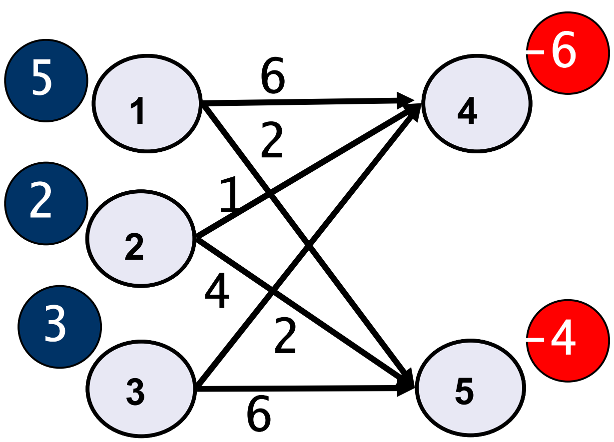


Soluzione ottima: $x_{11}=6$, $x_{12}=0$, $x_{21}=1$, $x_{22}=9$ con $z^*=1160$

Il problema del trasporto

Sottocaso particolare del flusso a costo minimo

- Non esistono nodi di passaggio.
- E' possibile andare da **ogni nodo offerta** (insieme **O**) a **ogni nodo richiesta** (insieme **D**).
- Il grafo sottostante è un **grafo bipartito.**



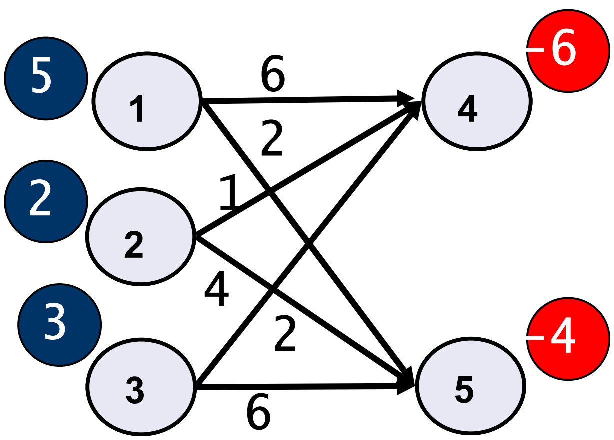
$$\min 6x_{14} + 2x_{15} + x_{24} + 4x_{25} + 2x_{34} + 6x_{35}$$

soggetto ai vincoli

$$x_{14} + x_{15} = 5$$
$$x_{24} + x_{25} = 2$$
$$x_{34} + x_{35} = 3$$
$$-x_{14} - x_{24} - x_{34} = -6$$
$$-x_{15} - x_{25} - x_{35} = -4 \qquad x_{ij} \geq 0$$

Il problema del trasporto

Consideriamo la **matrice di incidenza nodo-arco A** per il problema del trasporto



A	(1,4)	(1,5)	(2,4)	(2,5)	(3,4)	(3,5)
1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	0
3	0	0	0	0	1	1
4	-1	0	-1	0	-1	0
5	0	-1	0	-1	0	-1

-I **-I** **-I**

Struttura della matrice dei vincoli

$$
\begin{array}{c|ccccccccc|cc}
 & 1 & \ldots\ldots & n & n+1 & \ldots\ldots & 2n & (m-1)n+1 & \ldots\ldots & mn & & \\
\hline
1 & x_{11} & +\ldots+ & x_{1n}+ & & & & & & & = & o_1 \\
2 & & & & x_{21} & +\ldots+ & x_{2n} & & & & = & o_2 \\
\vdots & & & & & & & \ddots & & & = & \vdots \\
m & & & & & & & x_{m1} & +\ldots+ & x_{mn} & = & o_m \\
1 & -x_{11} & & & -x_{21} & & \ldots & -x_{m1} & & & = & -d_1 \\
\vdots & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots & & = & \vdots \\
n & & & -x_{1n} & & & -x_{2n} & & & -x_{mn} & = & -d_n \\
 & & \mathbf{-I} & & & \mathbf{-I} & & & \mathbf{-I} & & &
\end{array}
$$

Rango della matrice dei vincoli

Eliminando l'ultima riga della matrice e selezionando le seguenti m+n-1 colonne: n, 2n, 3n,...,mn,1,2,3,...,n-1 (nell'ordine indicato) otteniamo la seguente sottomatrice quadrata (triangolare superiore):

$$
\begin{array}{c|ccccccccc}
 & n & 2n & 3n & \ldots\ldots & mn & 1 & 2 & \ldots\ldots & n-1 \\
\hline
1 & 1 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 1 & 1 & \ldots & 1 \\
2 & 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\
\vdots & 0 & 0 & 1 & \ldots & 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\
\vdots & \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots \\
m & 0 & 0 & 0 & \ldots & 1 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & -1 & 0 & \ldots & 0 \\
\vdots & 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & -1 & \ldots & 0 \\
\vdots & \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots \\
n-1 & 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & \ldots & -1
\end{array}
$$

Th: *Se A è una matrice diagonale o triangolare superiore o triangolare inferiore allora il determinante di A è dato dal prodotto degli elementi sulla diagonale principale.*

Quindi la sottomatrice costruita è invertibile ed il rango di A è pari ad m+n-1

Problema del trasporto: Risoluzione

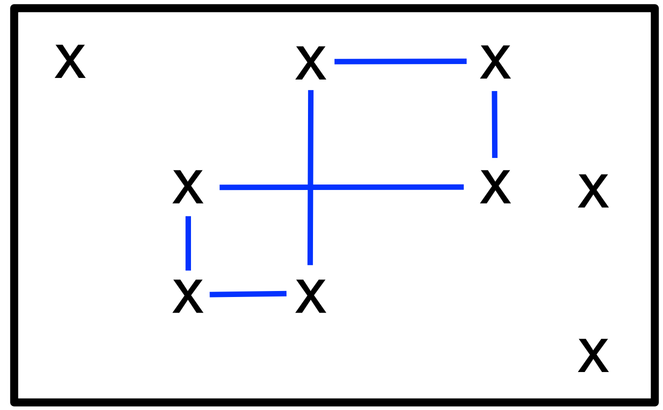
Possiamo rappresentare il problema tramite due tabelle, una relativa alle variabili l'altra relativa ai costi:

$$
\begin{array}{c|ccccc|c}
 & 1 & 2 & \dots & \dots & n & \\
\hline
1 & x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1n} & O_1 \\
2 & x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2n} & O_2 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & \dots & x_{mn} & O_m \\
\hline
 & d_1 & d_2 & \dots & \dots & d_n &
\end{array}
\qquad
\begin{array}{c|ccccc|}
 & 1 & 2 & \dots & \dots & n \\
\hline
1 & c_{11} & c_{12} & \dots & \dots & c_{1n} \\
2 & c_{21} & c_{22} & \dots & \dots & c_{2n} \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
m & c_{m1} & c_{m2} & \dots & \dots & c_{mn} \\
\hline
\end{array}
$$

Utilizziamo queste due tabelle per risolvere il problema

Problema del trasporto: Risoluzione

$$
\begin{array}{c|cccccc|c}
 & 1 & 2 & \dots & \dots & n & \\
\hline
1 & x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1n} & O_1 \\
2 & x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2n} & O_2 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & \dots & x_{mn} & O_m \\
\hline
 & d_1 & d_2 & \dots & \dots & d_n &
\end{array}
$$



Definizione (ciclo). In un problema del trasporto, si dice che una successione di variabili della tabella forma un ciclo se è possibile congiungere tali variabili con una successione di segmenti alternativamente orizzontali e verticali, aventi come estremi due di tali variabili. Inoltre partendo da una qualunque di queste variabili è possible ritornare ad essa, tramite questa successione, senza passare mai due volte per una stessa variabile.

Teorema. Condizione necessaria e sufficiente affinchè una soluzione ammissibile per il problema del trasporto sia di base è che essa abbia al più *m+n-1* componenti non nulle tali che nessun loro sottoinsieme formi cicli.

Problema del trasporto: Risoluzione

Per risolvere il problema dobbiamo:

1. Trovare una soluzione di base ammissibile iniziale:
   METODO DELL'ANGOLO DI NORD-OVEST

2. Migliorare la soluzione di base ammissibile corrente trovata fino a soddisfare le condizioni di ottimalità:
   REGOLA DEL CICLO

Metodo dell'Angolo di Nord-Ovest

Passo 0: Poni $x_{ij}=0$ per ogni i e per ogni j

Passo 1: $i=1, j=1$

Passo 2: $x_{ij}=minimo\ \{ o_i, d_j\}$

Se il minimo è uguale a o_i allora vai al passo 3

Se il minimo è uguale a d_j allora vai al passo 4

Passo 3: Poni $i = i+1;\ d_j = d_j - o_i$ e vai al passo 2

Passo 4: Poni $j = j+1;\ o_i = o_i - d_j$ e vai al passo 2

Metodo dell'Angolo di Nord-Ovest: Esempio

Consideriamo la seguente tabella dei costi:

	1	2	3	4	
1	10	5	6	7	25
2	8	2	7	6	25
3	9	3	4	8	50
	15	20	30	35	

NOTA:

m=3, n=4 quindi il rango della matrice A è r(A)=3+4-1=6. Quindi dobbiamo selezionare 6 variabili per ottenere una soluzione di base

Le iterazioni dell'algoritmo danno luogo alle seguenti tabelle di variabili:

Metodo dell'Angolo di Nord-Ovest: Esempio

	1	2	3	4	
1	0	0	0	0	25
2	0	0	0	0	25
3	0	0	0	0	50
	15	20	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	0	0	0	25
2	0	0	0	0	25
3	0	0	0	0	50
	15	20	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	0	0	0	10
2	0	0	0	0	25
3	0	0	0	0	50
	0	20	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	10
2	0	0	0	0	25
3	0	0	0	0	50
	0	20	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	0
2	0	0	0	0	25
3	0	0	0	0	50
	0	10	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	0
2	0	10	0	0	25
3	0	0	0	0	50
	0	10	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	0
2	0	10	0	0	15
3	0	0	0	0	50
	0	0	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	0
2	0	10	15	0	15
3	0	0	0	0	50
	0	0	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	0
2	0	10	15	0	0
3	0	0	0	0	50
	0	0	15	35	

Metodo dell'Angolo di Nord-Ovest: Esempio

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	25
2	0	10	15	0	25
3	0	0	15	35	50
	15	20	30	35	

Le variabili di base della soluzione ammissibile iniziale sono:

$$x_{11},\ x_{12},\ x_{22},\ x_{23},\ x_{33},\ x_{34}$$

Ora dobbiamo verificare se questa soluzione è ottima; se non è ottima cerchiamo un'altra soluzione con la regola del ciclo.

Condizioni di Ottimalità

Condizioni di ottimalità del simplesso:

$$z_j - c_j \leq 0 \quad \forall j \in N$$

$$\Downarrow$$

$$z_j - c_j = \underbrace{c_B^T A_B^{-1}}_{\text{Moltiplicatori del simplesso}} \underbrace{a_j}_{\text{Colonna della matrice corrispondente alla variabile } x_j} - \underbrace{c_j}_{\text{Coefficiente di costo della variabile } x_j} \leq 0 \quad \forall j \in N$$

Duale del problema del trasporto

$$\min \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}$$

$$(u_i) \qquad \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = o_i \qquad i = 1, \dots, m \qquad (1)$$

$$(v_j) \qquad -\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = -d_j \qquad j = 1, \dots, n \qquad (2)$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad i = 1, \dots, m\,;\; j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\Downarrow$$

$$\max \sum_{i=1}^{m} o_i u_i - \sum_{j=1}^{n} d_j v_j$$

$$u_i - v_j \leq c_{ij} \qquad i = 1, \dots, m, \qquad j = 1, \dots, n$$

Condizioni di Ottimalità

Dobbiamo verificare i valori z_{ij} - c_{ij} per ogni x_{ij} non in base.

Il calcolo di queste differenze si riduce al calcolo delle differenze dei valori delle variabili duali associate ai vincoli:

$$\mathbf{z_{ij} - c_{ij} = u_i - v_j - c_{ij}}$$

dove:

- u_i è la variabile duale associata all'i-simo vincolo di offerta e
- v_j è la variabile duale associata al j-simo vincolo di domanda.

Consideriamo la matrice dei costi iniziali e la matrice delle variabili corrispondente alla soluzione di base trovata:

	1	2	3	4	
1	10	5	6	7	25
2	8	2	7	6	25
3	9	3	4	8	50
	15	20	30	35	

	1	2	3	4	
1	15	10	0	0	25
2	0	10	15	0	25
3	0	0	15	35	50
	15	20	30	35	

Condizioni di Ottimalità

Le variabili duali sono 7 (4 associate ai vincoli di destinazione: v_1, v_2, v_3, v_4 e 3 associate ai vincoli di origine: u_1, u_2, u_3).

Possiamo determinare questi valori sapendo che $z_{ij} - c_{ij} = 0$ per ogni variabile x_{ij} in base. Per cui otteniamo:

$$x_{11} \Longrightarrow u_1 - v_1 = c_{11} = 10$$

$$x_{12} \Longrightarrow u_1 - v_2 = c_{12} = 5$$

$$x_{22} \Longrightarrow u_2 - v_2 = c_{22} = 2$$

$$x_{23} \Longrightarrow u_2 - v_3 = c_{23} = 7$$

$$x_{33} \Longrightarrow u_3 - v_3 = c_{33} = 4$$

$$x_{34} \Longrightarrow u_3 - v_4 = c_{34} = 8$$

Questo è un sistema di 6 equazioni in 7 incognite, per cui fissando a zero il valore di una variabile otteniamo i valori delle altre.

Condizioni di Ottimalità

Fissando u_1=0 otteniamo:

v_1= -10 , v_2= - 5 , v_3 = -10 , v_4 = -14 , u_2= -3 , u_3= -6

Da cui otteniamo :

$$z_{13} - c_{13} = u_1 - v_3 - c_{13} = 10 - 6 = 4$$

$$z_{14} - c_{14} = u_1 - v_4 - c_{14} = 14 - 7 = 7$$

$$z_{21} - c_{21} = u_2 - v_1 - c_{21} = -3 + 10 - 8 = -1$$

$$z_{24} - c_{24} = u_2 - v_4 - c_{24} = -3 + 14 - 6 = 5$$

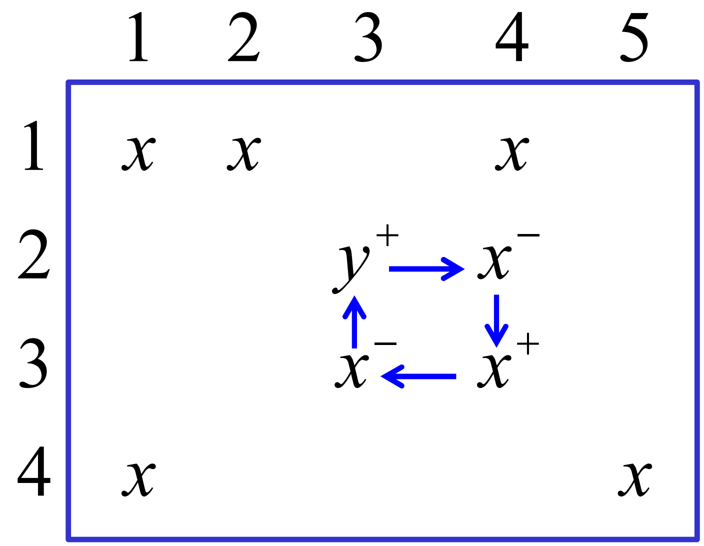
$$z_{31} - c_{31} = u_3 - v_1 - c_{31} = -6 + 10 - 9 = -5$$

$$z_{32} - c_{32} = u_3 - v_2 - c_{32} = -6 + 5 - 3 = -4$$

La soluzione non è ottima, quindi dobbiamo scegliere una variabile non in base da introdurre in base. Facciamo entrare in base la variabile con coefficiente di costo ridotto massimo ossia x_{14}.

Variabile Uscente: Regola del Ciclo

Supponiamo di avere la seguente tabella in cui le x rapresentano le variabili di base e la y la nuova variabile entrante.



La variabile entrante forma un ciclo con le variabili x_{24}, x_{34}, x_{33}. Tra queste dobbiamo selezionarne una da far uscire dalla base. La scelta viene effettuata nel seguente modo:

1. *Consideriamo le variabili in base che formano un ciclo con la variabile entrante;*
2. *I segni + e – sono assegnati in modo alternato negli angoli del ciclo partendo dalla variabile fuori base y a cui viene assegnato il + perchè deve essere incrementata di un nuovo valore $\Delta \geq 0$;*
3. *Le variabili di base che si trovano negli angoli del ciclo verranno incrementate di Δ, se hanno segno positivo, e decrementate di Δ, se hanno segno negative;*
4. *La variabile uscente sarà quella che si azzererà per prima.*

Nella matrice incrementiamo y, decrementiamo x_{24}, incrementiamo x_{34} e decrementiamo x_{41}. **Quanto vale Δ ?**

Δ = minimo{ x_{ij}: x_{ij} è coinvolta nel ciclo con segno meno }

Ritorniamo al nostro esempio. Scegliamo come variabile entrante $x_{14.}$ Il ciclo introdotto da y è disegnato in figura e Δ = 10.

	1	2	3	4	
1	15	- 10	0	y +	0
2	0	+ 10	15 -	0	0
3	0	0	+ 15	35 -	0
	0	0	0	0	

Esce la variabile x_{12}

	1	2	3	4	
1	15	0	0	10	0
2	0	20	5	0	0
3	0	0	25	25	0
	0	0	0	0	

Condizioni di Ottimalità

Poichè $z_{ij} - c_{ij} = 0$ per ogni variabile x_{ij} in base abbiamo:

$$x_{11} \Longrightarrow u_1 - v_1 = c_{11} = 10$$

$$x_{14} \Longrightarrow u_1 - v_4 = c_{14} = 7$$

$$x_{22} \Longrightarrow u_2 - v_2 = c_{22} = 2$$

$$x_{23} \Longrightarrow u_2 - v_3 = c_{23} = 7$$

$$x_{33} \Longrightarrow u_3 - v_3 = c_{33} = 4$$

$$x_{34} \Longrightarrow u_3 - v_4 = c_{34} = 8$$

$$\begin{array}{c|cccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & \\ \hline 1 & 15 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 2 & 0 & 20 & 5 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 25 & 25 & 0 \\ \hline & 0 & 0 & 0 & 0 & \end{array}$$

Fissato $u_1 = 0$ otteniamo:

$v_1 = -10, \quad v_4 = -7, \quad u_3 = 1, \quad v_3 = -3, \quad u_2 = 4, \quad v_2 = 2$

Condizioni di Ottimalità

$u_1 = 0 \quad v_1 = -10, \quad v_4 = -7, \quad u_3 = 1, \quad v_3 = -3, \quad u_2 = 4, \quad v_2 = 2$

$$z_{12} - c_{12} = u_1 - v_2 - c_{12} = 0 - 2 - 5 = -7$$

$$z_{13} - c_{13} = u_1 - v_3 - c_{13} = 0 + 3 - 6 = -3$$

$$z_{21} - c_{21} = u_2 - v_1 - c_{21} = 4 + 10 - 8 = 6$$

$$z_{24} - c_{24} = u_2 - v_4 - c_{24} = 4 + 7 - 6 = 5$$

$$z_{31} - c_{31} = u_3 - v_1 - c_{31} = 1 + 10 - 9 = 2$$

$$z_{32} - c_{32} = u_3 - v_2 - c_{32} = 1 - 2 - 3 = -4$$

	1	2	3	4	
1	15	0	0	10	0
2	0	20	5	0	0
3	0	0	25	25	0
	0	0	0	0	

La soluzione non è ottima, quindi dobbiamo scegliere una variabile non in base da introdurre in base. Facciamo entrare in base la variabile con coefficiente di costo ridotto massimo ossia x_{21}.

Condizioni di Ottimalità

Quale è il ciclo generato da y? Quanto vale Δ ?

	1	2	3	4	
1	$^{-}15$	0	0	10^{+}	0
2	$^{+}$**y**	20	5^{-}	0	0
3	0	0	$^{+}25$	25^{-}	0
	0	0	0	0	

Δ = 5 e la nuova base è:

	1	2	3	4	
1	10	0	0	15	0
2	5	20	0	0	0
3	0	0	30	20	0
	0	0	0	0	

Metodo del simplesso per il problema del trasporto

Passo 1: Trova una soluzione di base ammissibile con la regola dell'angolo di Nord-Ovest

Passo 2: Calcola z_{ij} - c_{ij} per ogni variabile non in base (con $z_{ij} - c_{ij} = u_i - v_j - c_{ij}$)

- Se $z_{ij} - c_{ij} \leq 0$ per ogni variabile non in base: STOP;
- Altrimenti seleziona la variabile entrante con il massimo $z_{ij} - c_{ij}$;

Passo 3: Determina la variabile uscente applicando la regola del ciclo;

Passo 4: Ricalcola la nuova soluzione di base ammissibile e torna al passo 2;