

ANALISI DELL'EFFICIENZA E DELLA SICUREZZA DI ESERCIZIO DI UN'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA*

Giovanni Leonardi

Dipartimento DICEAM

Via Graziella, 89122,

Reggio Calabria, Italia

giovanni.leonardi@unirc.it

Francis Cirianni

Presidente dell'Ordine degli Ingegneri

della Provincia di Reggio Calabria

Reggio Calabria, Italia

francis.cirianni@unirc.it

Abstract

An optimal management of a railway network constitutes a suitable and continuous requirement and it is necessary to assure to the users suitable standards of safety and comfort.

It is, therefore, necessary that the companies that have the management of the infrastructures equip themselves with an adaptive and cognitive instrument of the network, so to have an effective technical support for the decisions, at the various levels of competence.

In the present paper, an opportune methodology of approach to the problem is described. The proposed methodology is based on the construction of an informative network system, through the definition of one particular matrix $n \times m$, with $h = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, m$, where n is the number of the system variables under study (homogenous arcs of the network, nodes, routes, etc.) and m is the number of the considered characteristic indicators.

KEY WORDS: *Safety, Efficiency, Railway, Fuzzy Logic.*

1. Introduzione

L'ottimizzazione della gestione dell'esercizio di un complesso sistema infrastrutturale rappresenta uno degli elementi-chiave degli obiettivi programmatici degli Enti proprietari dell'infrastruttura, onde conseguire un opportuno contenimento dei costi e, nel contempo, per minimizzare gli oneri manutentivi garantendo all'utenza idonei standard di sicurezza e di comfort.

Oggi, grazie allo stato avanzato della ricerca nel settore stradale e ferroviario ed alle moderne tecnologie disponibili, è possibile procedere tempestivamente ed in modo opportuno all'analisi programmata del fabbisogno manutentivo della rete, elaborando una serie di dati scaturenti dall'osservazione dei valori di precisi indicatori che, tenuti opportunamente sotto controllo, consentono di conseguire l'obiettivo del raggiungimento della perfetta funzionalità di ogni infrastruttura e, al tempo stesso, di garantire elevati gradi di affidabilità per l'intera rete di trasporto.

Tuttavia, la grande quantità di parametri, che è necessario monitorare per avere una conoscenza continua e il più possibile completa delle reali condizioni di funzionamento di tutte le componenti del sistema (nodi, archi, etc.), spesso rende difficile e complessa la gestione ottimale della rete.

Bisogna, infatti, evidenziare come tale quantità d'informazioni, quand'anche fosse disponibile, non è sempre di facile e immediata interpretazione, poiché, le variabili considerate si riferiscono a diversi aspetti operativi non facilmente confrontabili l'uno con l'altro.

Appare, dunque, indispensabile lo studio di opportuni approcci metodologici che consentono una completa gestione delle informazioni, in modo da eliminare o minimizzare le situazioni anomale che possono comportare un aumento del livello di rischio localizzato o diffuso. In tale ottica, negli ultimi anni, hanno trovato forte sviluppo apposite metodologie di supporto alle decisioni, applicate all'ingegneria ferroviaria, basate sull'analisi multicriteria [1] e su strumenti matematici innovativi,

*Il documento nella sua interezza è frutto del lavoro congiunto dei due autori.

Mobilità, Accessibilità, Infrastrutture

quali la logica *fuzzy* e le reti neurali [2]. Alcuni di questi studi affrontano le problematiche legate all'analisi e valutazione delle informazioni nei processi decisionali legati alla gestione delle infrastrutture ferroviarie.

Nella presente memoria si vuole proporre un opportuno approccio metodologico che consenta una completa gestione delle informazioni in modo da eliminare o minimizzare le situazioni anomale che possono comportare un aumento del livello di rischio localizzato o diffuso.

2. Una caratterizzazione matematica della qualità dell'offerta

Il funzionamento di una rete è dipendente da molteplici fattori di diversa natura legati tra loro da numerose interdipendenze riconducibili, nel loro complesso, all'analisi del sistema "ambiente-infrastruttura-veicolo-uomo" [3; 4]. Al fine di assicurare in ogni condizione operativa adeguati standard di sicurezza ed efficienza, è indispensabile monitorare in tempo reale la qualità di funzionamento della

rete per individuare quelle situazioni critiche che richiedono immediati interventi di manutenzione e/o gestione. Gli Enti gestori della rete dovranno, di conseguenza, dotarsi di appositi modelli di analisi, che attraverso una elaborazione più o meno complessa dei dati di input, consentano di valutare in termini quantitativi il grado di efficienza del sistema.

In tale ottica, la qualità di funzionamento delle linee e dei nodi del sistema infrastrutturale su rotaia, indicando con x_{hk} la generica variabile tra le m complessivamente monitorate, può essere rappresentata nello spazio m -dimensionale R^m di riferimento mediante una matrice:

$$x_{hk}$$

con $h = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$, dove n sono le componenti del sistema prese in esame (archi omogenei della rete, nodi, itinerari, etc.) per l'ottimizzazione della gestione dell'esercizio sotto il profilo dell'efficienza operativa e della sicurezza [Vedi Fig. 1].

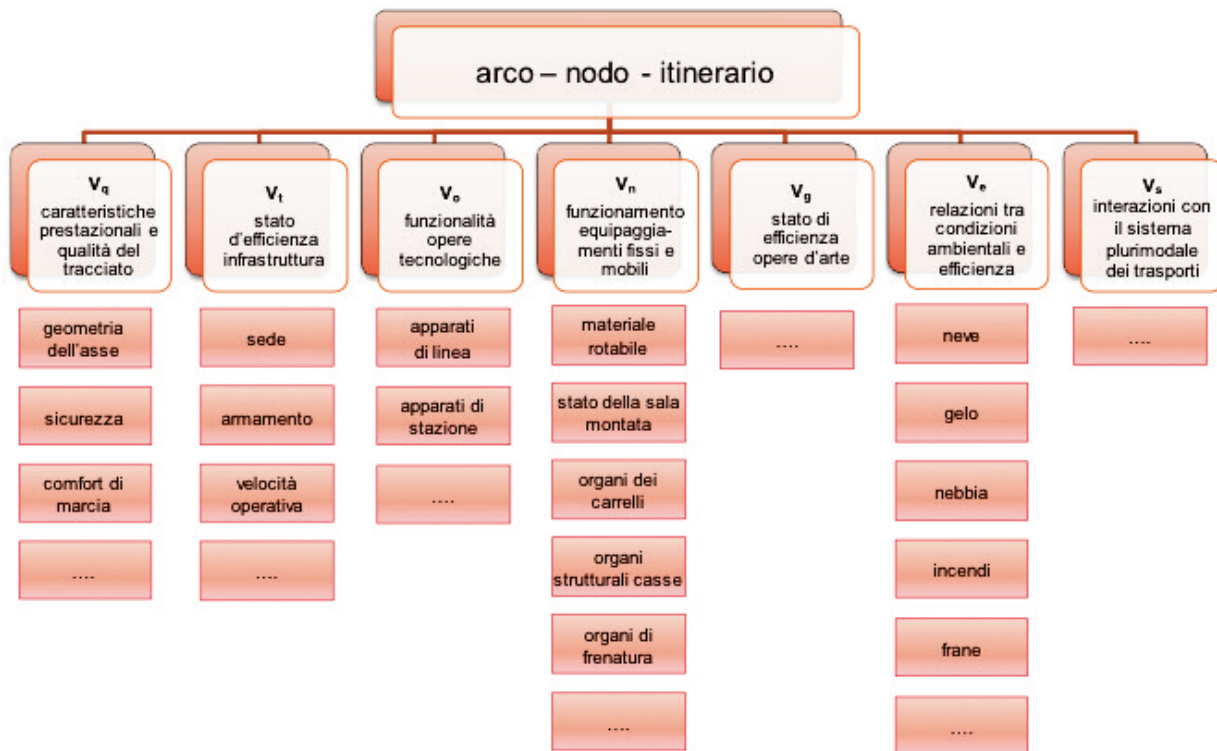


Fig.1 - Classi di variabili considerate.

Se, infatti, per la generica componente h -esima della rete indichiamo con:

- il vettore delle caratteristiche prestazionali e di qualità del tracciato (geometria dell'asse, sicurezza e comfort di marcia, etc.);
- $\mathbf{1} V_t$ il vettore rappresentativo dello stato d'efficienza dell'infrastruttura (sede, armamento, velocità media operativa, etc.);
- $\mathbf{1} V_o$ il vettore caratterizzante la funzionalità e le eventuali carenze delle opere tecnologiche e degli apparati di linea e di stazione;

- $\mathbf{1} V_n$ il vettore caratterizzante il funzionamento degli equipaggiamenti fissi e mobili (deficit del materiale rotabile, stato della sala montata, organi strutturali ed elastici dei carrelli, organi strutturali delle casse, organi di frenatura, affidabilità dei componenti del sistema di equipaggiamento e segnalamento per i distanziatori di linea, etc.);
- $\mathbf{1} V_g$ il vettore rappresentativo dello stato di efficienza delle opere d'arte a servizio dell'infrastruttura;
- $\mathbf{1} V_e$ il vettore delle relazioni esistenti tra particolari condizioni ambientali (neve, gelo, nebbia, incendi,



frane, etc.) e stato di efficienza dell'infrastruttura il vettore caratteristico delle interazioni con il V_s contesto di sistema plurimodale dei trasporti a cui lo stesso appartiene;

si può globalmente fare riferimento al vettore X (insieme unione delle classi di variabili).

In simboli, si ha:

$$X = V_q \cup V_t \cup V_o \cup V_g \cup V_e \cup V_s \quad (1)$$

Si consideri, allora, il caso in cui il vettore X abbia componenti x_k , con $k = 1, \dots, m$, ciascuno di questi vettori sarà formato da elementi x_{hk} , con $h = 1, \dots, n$, relativi ad ogni variabile k -esima osservata. Pertanto, può essere costruita la matrice $X_{n \times m}$ costituita da n (numero di componenti omogenee della rete) righe.

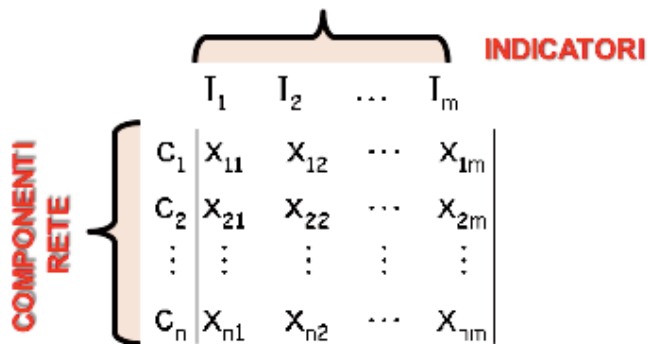


Fig. 2 - Matrice rappresentativa dello stato funzionale dell'infrastruttura.

Definita la matrice rappresentativa dello stato funzionale dell'infrastruttura (Vedi Fig. 2), occorre sviluppare un idoneo algoritmo per conseguire una sintesi dei numerosi dati misurati, in modo da avere un efficace strumento di analisi per l'ottimizzazione complessiva degli interventi di manutenzione e di riqualificazione [5].

3. Il modello proposto

L'approccio operativo di seguito illustrato, attraverso l'impiego di concetti tipici dell'analisi multivariata e della logica fuzzy, si pone l'obiettivo di mettere a punto un'apposita struttura gerarchica di dominanza, facilmente interpretabile con metodi di valutazione ormai consolidati come l'Analytic Hierarchy Process - AHP (Saaty 1980) [6; 7; 8].

Fra i diversi tipi di analisi multivariata, in particolare, si utilizza l'analisi fattoriale delle componenti principali [9]. L'analisi fattoriale è un metodo statistico idoneo a ridurre un sistema complesso di correlazioni in uno di minori dimensioni, realizzando un'opportuna economia descrittiva dei fenomeni e dei processi osservati, pertanto, l'obiettivo dell'analisi in componenti principali è quello di ridurre un insieme di informazioni nelle sue componenti principali

minimizzando la perdita di conoscenze.

Le componenti principali vengono prodotte come combinazioni lineari delle variabili originarie. Ciascuna componente principale è caratterizzata da un autovalore, che esprime la proporzione della varianza riprodotta dalla componente stessa; le prime componenti estratte sono quelle che hanno autovalori più elevati e, cioè, sintetizzano al meglio l'informazione contenuta nella matrice dei dati originaria.

L'interpretazione delle componenti principali avviene attraverso le loro correlazioni con le variabili originali: ogni variabile presenta, infatti, una correlazione con le componenti principali, ma alcune esibiranno più alte correlazioni con una data componente principale.

Più elevata è la correlazione, più la variabile è legata con quella particolare componente principale.

Alla luce di quanto esposto, partendo dalla matrice X costruita, si determina la matrice di correlazione C , fornita dal prodotto della trasposta della matrice per la matrice stessa:

$$C = X \cdot X \quad (2)$$

Il calcolo delle radici dell'equazione caratteristica

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (3)$$

dove I è la matrice identità di ordine m e un vettore colonna di zeri, permette di determinare gli autovalori λ_h ($h = 1 \dots m$, con $\lambda_h \geq 0$).

Dopo aver ordinato gli autovalori dal più grande al più piccolo:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$$

gli autovettori corrispondenti sono determinati dall'equazione matriciale:

$$(C - \lambda_h) \cdot g_h = 0 \quad (4)$$

I vettori g_1, g_2, \dots, g_m determinano gli assi fattoriali della matrice di correlazione e le loro componenti sono rappresentate da m funzioni lineari non correlate [9; 10].

Ciascuna di tali componenti, essendo una combinazione lineare particolare delle variabili di partenza, può essere considerata alla stregua di una variabile artificiale, ossia:

$$f_i = \sum_{k=1}^m g_{ki} \cdot x_k \quad (5)$$

essendo f_i ($i = 1, \dots, m$) la i -esima componente principale. Si pone ora il problema di decidere quali e quante componenti utilizzare per ottenere una più efficace sintesi dei dati.

Uno dei criteri che può essere utilizzato è quello di considerare tutte le componenti con autovalore λ_h maggiore o uguale ad 1 [9, 11].

Mobilità, Accessibilità, Infrastrutture

In generale, il numero di fattori con autovalore superiore a 1 varia tra $1/6$ e $1/3$ del numero di variabili esaminate; si consegue, così, una notevole economia descrittiva riducendo il numero delle variabili da m a s (con $s < m$) senza, però, che ciò comporti una sostanziale perdita d'informazioni.

Analizzando la matrice di correlazione tra le componenti principali determinate e le variabili originarie, è possibile valutare i pesi fattoriali individuando per ciascuna componente principale gli indicatori ad essa associati.

Per ogni componente della rete è possibile, quindi, costruire una struttura gerarchica a tre livelli (Vedi Fig. 3): il primo livello è occupato dal ricercato indicatore globale caratterizzante lo stato funzionale della componente analizzata, il secondo è rappresentato dalle s componenti principali e il terzo contiene le m variabili originarie, ognuna delle quali è associata alla componente principale in cui presenta il maggior peso fattoriale.

I pesi così stimati sono detti locali perché valutano l'importanza degli elementi non in termini complessi, ma solo in rapporto all'elemento sovraordinato.

Per determinare l'importanza di ogni elemento in rapporto al primo livello, occorre moltiplicare i pesi locali di ogni elemento per quello del corrispondente elemento sovraordinato.

Procedendo dall'alto verso il basso, i pesi locali di tutti gli elementi della gerarchia sono trasformati progressivamente in pesi globali.

Il peso globale W delle componenti principali è uguale a quello locale (dipendente dalla percentuale di varianza spiegata) poiché l'unico elemento al primo livello ha, evidentemente, peso pari ad uno.

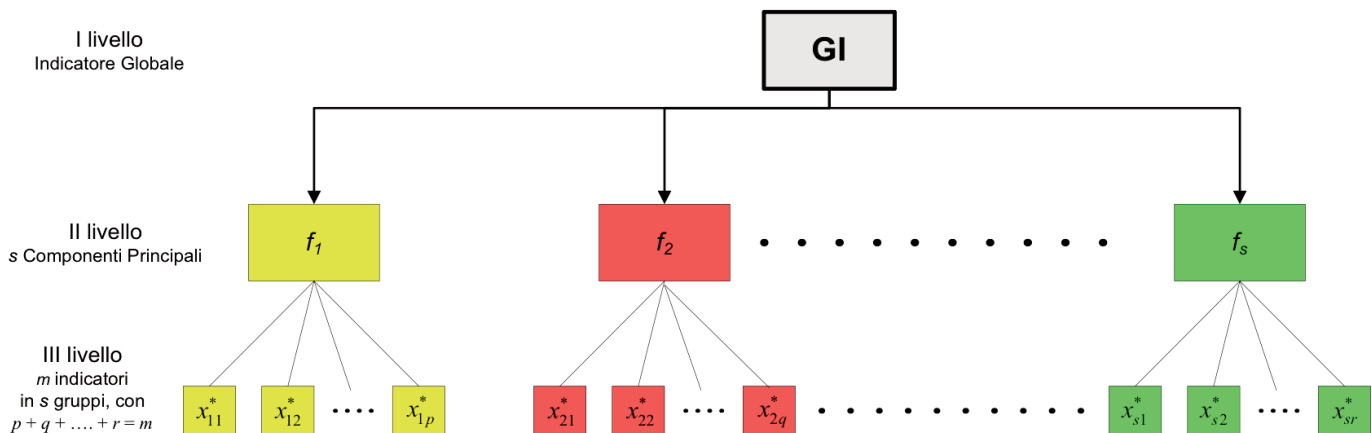


Fig. 3 - Struttura gerarchica AHP a tre livelli.

Costruita la struttura gerarchica, è opportuno normalizzare tutti gli indicatori e, eventualmente, ove necessario, invertirli di scala, in modo da ricondurli all'interno di un'unica scala di valutazione 0-1; dove 0 e 1 rappresentano rispettivamente la performance ideale e anti-ideale [11].

Tutti gli elementi x_{hk} di $\frac{1}{x}$ sono, quindi, trasformati in elementi x^*_{hk} con $0 \leq x^*_{hk} \leq 1$.

Il metodo AHP prevede la determinazione dei pesi degli elementi della gerarchia di dominanza attraverso una serie di confronti a coppie e utilizzando un'apposita scala di giudizi [12; 13].

Nel caso in esame alle s componenti principali del secondo livello viene assegnato un peso in funzione della percentuale di varianza spiegata.

Al terzo livello viene assegnato, a ciascun indicatore, associato alla stessa componente principale, un peso uguale (i.e., per tutti gli indicatori associati alla componente f_1 il peso è pari a $1/p$, per quelli associati alla componente f_2 è pari a $1/q$ e così via fino all'ultima componente f_s).

Al terzo livello, invece, si ha:

per gli p indicatori associati alla componente f_1

$$w_{11} = w_{12} = \dots = w_{1p} = W_1 \cdot \left(\frac{1}{p} \right), \text{ essendo } W_1 \text{ il peso}$$

della componente principale f_1 ;

per gli q indicatori associati alla componente f_2

$$w_{21} = w_{22} = \dots = w_{2q} = W_2 \cdot \left(\frac{1}{q} \right), \text{ essendo } W_2 \text{ il peso}$$

della componente principale f_2 ;

.....

per gli r indicatori associati alla componente f_s

$$w_{s1} = w_{s2} = \dots = w_{sr} = W_s \cdot \left(\frac{1}{r} \right), \text{ essendo } W_s \text{ il peso}$$

della componente principale f_s .

La metodologia di assegnazione applicata rappresenta solo una delle possibili soluzioni per la determinazione dei pesi che, più in generale, possono essere stimati utilizzando altre procedure note in letteratura.

3.1 L'analisi del modello

Le n strutture gerarchiche costruite consentono di valutare lo stato funzionale delle unità di osservazione considerate (archi, itinerari, nodi, etc.) calcolando per ciascun indicatore la distanza *fuzzy* dalla condizione ideale (Vedi Fig. 4).

Si è scelto di utilizzare procedure di analisi *fuzzy* perché alcuni dei fattori considerati mal si prestano a una quantificazione-valutazione univoca mediante procedure classiche, infatti, in alcuni casi sono variabili all'interno delle stesse unità di osservazione, in altri, possono essere soltanto stimati con un certo margine di errore.

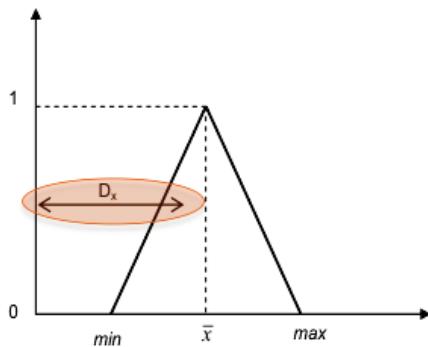


Fig. 4 - Numero fuzzy triangolare.

Ciascun indicatore è trasformato in un numero fuzzy triangolare utilizzando il suo valore medio e il suo possibile *range* (valore minimo e massimo) all'interno dell'unità di osservazione:

La distanza *fuzzy* tra la condizione ideale, rappresentata dal numero triangolare *fuzzy* $[a_1, a_2, a_3]^T$, essendo $a_1 = a_2 = a_3 = 0$, ed il valore *fuzzy* di ciascun indicatore $[b_1, b_2, b_3]^T$ si calcola usando la seguente espressione:

$$D_x^2 = b_2^2 + \frac{1}{3}b_2 \cdot (b_3 + b_1) + \quad (6)$$

$$\frac{1}{18} [(b_3 - b_2)^2 + (b_2 - b_1)^2] - \frac{1}{18} [(b_2 - b_1)(b_3 - b_2)]$$

Le distanze di un livello superiore sono valutate come somma pesata delle distanze al livello inferiore:

$$D_{\text{livello } j}^{\text{variabile } f_s} = \sum_{k=1}^r w_{sk} \cdot D_{\text{livello } j+1}^{\text{variabile } x_{sk}^*} \quad (7)$$

dove $D_{\text{livello } j}^{\text{variabile } f_s}$ è la distanza della variabile f_s al livello j , w_{sk} è il peso della variabile x_{sk}^* livello $j+1$ ed r è il numero degli indicatori al livello $j+1$ associati alla variabile f_s del livello j .

Ad esempio, per la prima componente principale si ha:

$$D_{\text{livello } 2}^{\text{variabile } f_1} = \sum_{k=1}^p w_{1k} \cdot D_{\text{livello } 3}^{\text{variabile } x_{1k}^*} \quad (8)$$

La distanza finale al primo livello caratterizza quanto il funzionamento dell' i -esima componente della rete, tra le complessive n analizzate, si discosta dagli standard prestazionali ideali del sistema, sia sotto il profilo dell'efficienza operativa, che della sicurezza di esercizio, ovvero: criticità componente i -esima F [distanza stato ottimale e stato reale di funzionamento].

4. Conclusioni

Una corretta gestione dell'esercizio della rete ferroviaria non può prescindere da un completo e continuo monitoraggio della qualità dell'offerta, onde ottimizzare, in modo dinamico, il sistema "ambiente-infrastruttura-veicolo-uomo". Occorre, pertanto, disporre di un opportuno strumento conoscitivo, di tipo dinamico, delle reali condizioni di esercizio e del connesso fabbisogno di interventi sulle singole componenti della rete viaria, per garantire all'utenza adeguati standards di qualità e di sicurezza.

Nella presente memoria, individuata un'apposita metodologia di approccio al problema, per un'efficace gestione informatizzata delle informazioni, viene elaborato un particolare modello interpretativo dello studio della qualità dell'offerta di rete che si basa su taluni strumenti di algebra vettoriale e di logica *fuzzy*.

Rappresentato il problema nello spazio R_m degli indicatori misurati è stato, così, possibile calcolare, mediante un algoritmo, un particolare parametro caratterizzante gli standard operativi della componente di rete, rendendo, così, agevole l'individuazione delle situazioni critiche che necessitano di una particolare attenzione.

Bibliografia

- [1] Nyströma B., Söderholma P., "Selection of maintenance actions using the analytic hierarchy process (AHP): decision-making in railway infrastructure", Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 6, No. 4, 2010
- [2] Kabira G., Sadiqa R., Tesfamariam S., "A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management", in: Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 10, No. 9, 1176-1210, 2014
- [3] Corriere F., Lo Bosco D., "La gestione degli impianti ferroviari complessi per l'economicità, l'efficienza e la sicurezza dell'esercizio", in: IX Convegno SIEV, Cagliari 28 - 29 ottobre 1999
- [4] Leonardi G., Moretti M., Stoka M., "L'analisi del funzionamento della rete. Un approccio metodologico", RFI Argomenti - n. 1 ottobre 2003
- [5] Lo Bosco D., "Un criterio matematico per l'analisi sistemica degli indicatori sintetici adoperati nello studio del binomio "strada-ambiente", Autostrade, n. 1, 1995
- [6] Saaty T.L., "A scaling method for priorities in hierarchical structures", J. Math. Psychology, 1977
- [7] Saaty T.L., "The analytic hierarchy process", McGraw-Hill International, New York, 1980
- [8] Saaty T.L., "Fundamentals of decision making and priority theory with the AHP", RWS Publications, Pittsburgh, PA, 1994



Mobilità, Accessibilità, Infrastrutture

[9] Fabbris L., *"Statistica multivariata"*, McGraw-Hill, 1997

[10] Stoka M., *"Calcolo della probabilità e statistica matematica"*, Levrotto & Bella, Torino, 1993

[11] Tran L. T., Knight C. G. et al., *"Environmental Assessment: Fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the Mid-Atlantic region"*, Environmental Management Vol. 29, n. 6, 2002

[12] Triantaphyllou E., *"Reduction of pairwise comparisons in decision making via a duality approach"*, in: Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, vol.8, 1999

[13] Leonardi G., *"Using the multi-dimensional fuzzy analysis for the project optimization of the infrastructural interventions on transport network"*, in: Atti della "IV International Conference of Stochastic Geometry, Convex Bodies, Empirical Measures & Application to Engineering Science", Tropea, 24 - 29 settembre 2001