



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

IN INGEGNERIA DEL TERRITORIO

Ciclo XXVIII

TITOLO TESI

IMPLEMENTAZIONE DI MODELLI DI AIUTO ALLE DECISIONI, BASATI
SU TECNICHE DI ANALISI MULTI-CRITERIA, COME SUPPORTO ALLA
PROGRAMMAZIONE DELLE STRATEGIE E DELLE AZIONI SULLE RETI
DI TRASPORTO STRADALE

Settore scientifico disciplinari di afferenza

ICAR/05 - Trasporti

Presentata da:	Michele Carta
Coordinatore Dottorato	Prof. Roberto Deidda
Tutor	Prof. Gianfranco Fancello

Esame finale anno accademico 2015 – 2016
Tesi discussa nella sessione d’esame marzo – aprile 2017

Sommario

Abstract	6
Introduzione	8
1. Il processo valutativo.....	12
1.1 Il tema della valutazione	12
1.2 La valutazione nei sistemi complessi	14
1.3 La valutazione nel sistema dei trasporti	16
2. L'analisi multi-criteria	20
2.1 Introduzione	20
2.2 Le principali problematiche.....	23
2.3 Un approccio metodologico per la programmazione delle azioni di Piano	26
3. Le tecniche di analisi	29
3.1 Introduzione.....	29
3.2 Analisi Concordante.....	33
3.3 Analisi Concordante modificata con passaggio iterativo.....	36
3.4 Analisi Concordante modificata con valutazione della distanza	37
3.5 Electre III	37
3.6 VIKOR	44
3.7 TOPSIS.....	46
4. Applicazioni.....	49
4.1 Introduzione.....	49
4.2 Un modello innovativo per la valutazione delle reti stradali urbane mediante indicatori sintetici di prestazione	51
4.2.1 Introduzione	51
4.2.2 Metodologia	51
4.2.3 Selezione dei criteri.....	52
4.2.4 Applicazione	59
4.2.5 Risultati e Conclusioni	61
4.3 Un sistema di supporto alle decisioni basato sull'analisi concordante per le analisi sulla sicurezza stradale.....	63
4.3.1 Introduzione	63

4.3.2	Metodologia	64
4.3.3	Selezione dei criteri.....	64
4.3.4	Applicazione	66
4.3.5	Risultati.....	68
4.3.6	Conclusioni	72
4.4	Un sistema di supporto alle decisioni basato sul metodo Electre III per le analisi di sicurezza stradale.....	74
4.4.1	Introduzione	74
4.4.2	Metodologia	76
4.4.3	Applicazione	76
4.4.4	Conclusioni	80
4.5	Gerarchizzazione di intersezioni in una rete stradale urbana.....	82
4.5.1	Introduzione	82
4.5.2	Metodologie	82
4.5.3	Selezione dei criteri.....	83
4.5.4	Applicazione	89
4.5.5	Analisi di sensitività.....	95
4.5.6	Conclusioni	97
5.	Un nuovo approccio per l'analisi multi-criteria: Il metodo MTA (multi-criteria trigonometric approach)	99
5.1	Introduzione	99
5.2	Specificazione dell'algoritmo	103
5.3	Un esempio numerico.....	105
5.4	Confronto	108
5.5	Conclusioni	115
	Conclusioni	117
	Bibliografia	120

Abstract

Assessment is a topic widely discussed in scientific literature, with important influences on many sectors of practical interest. Assessment is part of a decision-making process and it is possible to define the utility of a series of decision-making actions by using a simplified representation of it and according to the goals set. This research work concerns planning in the road transport sector, where assessment is often complex, and it involves many actors and a multidimensional target system. This research work proposes a state of the art of the multi-criteria analysis methods used by scientific literature to support decision-making activities in the road transport sector, together with some applicative case studies carried out during the PhD course. The aim of the study was to set the general topic of the assessment system, standing out the main system components and their interactions. The scientific bibliography has offered a fundamental investigation field on the representation of the interactions made in the assessment process, through the study of mathematical models which allow to translate the decision-making activity using analytic functions. This activity was combined with the application of the decision-making methods to real practical cases, where the decision-making support system helps a subject who has to make a choice in the transport planning sector. In order to provide support to a decision-maker during the assessment of possible intervention strategies for planning the actions of the Plan and of the projects concerning the transport sector, we have represented the structure of a decision-making support system which permits to reach the goals set on the transport and mobility system. In the case studies analysed in this research work, the assessor - according to the methodological approach presented - supports the decision-maker in order to make an assessment based on objective criteria, which reflect the requests of the stakeholders by applying multi-criteria analysis methods. Among the issues which can be dealt with the support of multi-criteria analysis methods, the applicative cases address choice and hierarchization issues. The choice occurs when it is necessary to identify an option among many possible options, able to meet the multiple goals better than the others. The request to provide a hierarchical order instead occurs when it is necessary to schedule a series of interventions for

the issues described. Therefore, it is necessary to assign some options which must be all carried out according to a priority order. To overcome the critical issues highlighted by using the multi-criteria analysis methods consolidated in scientific literature, in this research work we proposed a multi-criteria analysis method called MTA (Multi-criteria Trigonometric Approach), aimed at representing the preferable alternative within a decision-making set by using a trigonometric function, in order to create a hierarchy of options according to a goal system. The MTA model represents a first step which paves the way for other research works about the study of shapes of preference function, as well as any development for the implementation of a weight system to be assigned to priority differentiating criteria.

INTRODUZIONE

La valutazione rappresenta un tema largamente trattato in ambito scientifico e caratterizzato da importanti ricadute in molteplici settori di interesse pratico. L'eterogeneità dei settori in cui questo concetto può essere articolato, conduce ad una molteplicità di descrizioni del fenomeno, che non sempre possono dar luogo ad una definizione sintetica o ad una rappresentazione univoca degli elementi che concorrono alla formazione del processo. L'elemento fondamentale su cui si basa la rappresentazione di un sistema di valutazione, consiste nel concetto di misura di un fenomeno. La valutazione nasce all'interno di un processo decisionale e ne riproduce una rappresentazione semplificata basandosi su criteri di scelta, attraverso i quali viene valutata e comparata la desiderabilità delle alternative decisionali in funzione del sistema di obiettivi preposti.

Nel settore della pianificazione dei trasporti, la valutazione assume spesso una connotazione complessa, coinvolgendo molteplici interessi caratterizzati da una natura multidimensionale. Le molteplici dimensioni che caratterizzano il sistema di obiettivi, consente di non limitare il campo di indagine esclusivamente ad una dimensione, per esempio quella economica, ma di tenere conto anche di tutti quegli obiettivi che non sono monetizzati o monetizzabili, altrimenti esclusi dall'analisi.

Le tecniche di analisi a criteri multipli, introdotte nell'ambito di un processo decisionale, permettono di supportare l'attività di un soggetto che deve compiere una decisione, per condurlo ad una scelta finale giustificata in modo oggettivo, sulla base delle istanze presentate

dai portatori di interesse coinvolti nel processo. Gli interessi possono essere variegati e sono rappresentati da un sistema di funzioni obiettivo che possono essere anche contrastanti tra loro, nel senso che il raggiungimento di un obiettivo può comportare il contemporaneo allontanamento da un altro. In questo caso è possibile esprimere la valutazione in termini relativi, non cercando necessariamente il raggiungimento di tutti gli obiettivi, che può corrispondere ad una situazione ideale e non reale, ma ricercando una condizione di miglior compromesso.

La complessità che caratterizza molte delle problematiche che interessano i sistemi dei trasporti, rende necessario adottare un approccio valutativo basato sulle metodologie di analisi a criteri multipli. Attraverso l'utilizzo di questi metodi di analisi, è possibile definire la struttura di un sistema di supporto alle decisioni capace di fornire al soggetto decisionale una metodologia che lo conduca alla valutazione delle possibili strategie di intervento per la programmazione delle azioni di Piano e dei progetti, che interessano il sistema dei trasporti.

Strutturare un processo decisionale basato su un'analisi a criteri multipli significa affrontare la complessità del sistema individuando una struttura metodologica di riferimento, articolata in diverse fasi, tale da definire un approccio metodologico finalizzato alla risoluzione del procedimento valutativo. Con la finalità di delineare un approccio integrato, per la programmazione e la scelta delle azioni la cui realizzazione consente di raggiungere gli obiettivi preposti sul sistema dei trasporti e della mobilità, è possibile definire un percorso decisionale caratterizzato da elementi fondamentali. L'operazione preliminare riguarda la definizione degli obiettivi, attraverso un'azione di concertazione messa in opera tra il valutatore, il soggetto decisionale e i portatori di interesse coinvolti nel processo. Occorre inquadrare la problematica di analisi, con riferimento alla possibilità che il problema decisionale sia indirizzato per esempio alla scelta di una, tra un insieme di possibili azioni, oppure che riguardi il loro raggruppamento in classi omogenee o ancora che l'obiettivo sia quello di una loro gerarchizzazione per priorità. Alla base del modello viene definito l'insieme decisionale di alternative e l'insieme dei criteri di valutazione, dove la valutazione viene eseguita attraverso il confronto tra la misura degli impatti diretti, indiretti ed indotti, determinati dagli interventi. L'applicazione della metodologia di analisi multi-criteria condurrà alla definizione della scelta finale e ad una sua giustificazione oggettiva sulla base di un percorso dove valutatore, soggetto decisionale e portatori di interesse hanno svolto un ruolo attivo.

Il presente lavoro di ricerca propone uno stato dell'arte sui metodi di analisi multicriteria utilizzati nella letteratura scientifica a supporto di attività decisionali nel settore dei trasporti stradali, coniugata con una serie di casi studio applicativi condotti durante il percorso dottorale. L'attività di ricerca ha avuto l'obiettivo di inquadrare il tema generale del sistema della valutazione, caratterizzando le componenti principali del sistema e le loro interazioni. Quest'attività è stata accompagnata dall'applicazione delle metodologie decisionali a reali casi pratici, dove il sistema di supporto alle decisioni è stato utilizzato per supportare l'attività di un soggetto decisionale, nel settore della pianificazione dei trasporti. I casi applicativi affrontano nello specifico problematiche di scelta e di gerarchizzazione. La scelta si verifica quando occorre individuare una opzione, tra un insieme di opzioni possibili, capace di soddisfare meglio delle altre i molteplici obiettivi. La necessità di fornire un ordine gerarchico invece si verifica, nelle problematiche descritte, quando è richiesta la programmazione temporale di una serie di interventi, per cui occorre assegnare alle opzioni, un ordine di priorità.

Nei casi studio presentati, la scelta dell'insieme dei criteri su cui si basa la valutazione delle alternative risponde a due requisiti fondamentali. Il primo requisito riguarda la rappresentazione del sistema di obiettivi posto a base delle analisi, devono cioè rappresentare le istanze dei soggetti portatori di interesse. Inoltre trattandosi di reali casi applicativi, per determinare il loro valore in corrispondenza di ciascuna azione, non devono essere richieste complesse indagini ed elaborazione, ma gli indicatori devono basarsi su dati che possibilmente sono già nelle disponibilità dell'amministratore della rete o che comunque risultano facilmente determinabili, per esempio attraverso rilievi geometrici e di traffico effettuati in situ o attraverso richieste agli uffici statici, per quanto riguarda i dati storici relativi all'incidentalità.

Il presente lavoro di tesi è articolato nel modo seguente. Nel capitolo 1 è presentato lo stato dell'arte della valutazione, con il panorama della caratterizzazione fornita dai principali autori nella letteratura scientifica di panorama nazionale ed internazionale. Nel secondo capitolo viene caratterizzata l'analisi effettuata in presenza di criteri multipli, all'interno di un processo decisionale. Vengono descritte le principali problematiche che si possono affrontare e viene specificato un approccio metodologico integrato dove l'analisi a criteri multipli può supportare un'attività decisionale. Nel capitolo 3 vengono presentate alcune tecniche di analisi utilizzate nel successivo capitolo di applicazioni. Vengono presentate sia metodologie di analisi dall'uso consolidato nella letteratura scientifica, sia proposte di modifiche all'algoritmo in funzione delle

esigenze di funzionalità proposte per venire incontro alle esigenze dei casi studio analizzati nel seguito. Nel capitolo 5 viene presentata una nuova metodologia di analisi a criteri multipli, che si propone di superare le criticità emerse utilizzando le metodologie consolidate e propone la specificazione di una funzione trigonometrica per rappresentare la preferibilità delle alternative appartenenti all'insieme decisionale.

1. IL PROCESSO VALUTATIVO

1.1 IL TEMA DELLA VALUTAZIONE

Il tema della valutazione è stato trattato in numerose opere pubblicate nella letteratura scientifica, tuttavia a causa della eterogeneità dei campi in cui questo concetto può essere articolato, non vi si ritrova una definizione univoca e riconosciuta da parte di tutti gli autori, né vengono individuati e rappresentati in modo rigido gli elementi che concorrono alla formazione di questo processo. Proprio a causa della eterogeneità degli elementi che caratterizzano il sistema della valutazione, nella letteratura scientifica vi si ritrovano una molteplicità di definizioni e concettualizzazioni.

Nel programma “MEANS” – Method for Evaluating Actions of Structurale Nature, avviato nel 1991 dalla Direzione generale per la politica e la coesione regionale della Commissione Europea (Comission European, 1999) con lo scopo di favorire la diffusione dei metodi di valutazione, viene definita la valutazione dell'intervento pubblico come “il giudizio del suo valore in relazione a criteri espliciti e su basi informative specificatamente raccolte ed analizzate”. L'autore mette in evidenza che la valutazione si deve basare sulla conoscenza approfondita delle informazioni e che il giudizio deve avvenire sulla base di criteri oggettivi, che rendono chiari gli obiettivi che si vogliono raggiungere. Lapucci in (Lapucci, 2010) presenta uno stato dell'arte della caratterizzazione del sistema della valutazione nella letteratura scientifica. Bertin in (Bertin, 1995) definisce la valutazione come quel processo che accompagna lo sviluppo delle decisioni,

consentendo al decisore di esprimere un giudizio possibilmente libero da stereotipi e pregiudizi. Secondo questa definizione si caratterizza la valutazione come un processo che accompagna lo sviluppo di decisioni e che consente di esprimere un giudizio libero e quindi oggettivo. Bulgarelli in (Bulgarelli, 1997) afferma che valutare significa misurare la portata di un fenomeno, analizzarne i risultati e l'efficacia attraverso serie di indicatori disegnati e costruiti ad hoc, identificare positività e criticità, ipotizzare tendenze e possibili suggerimenti utili alla programmazione e gestione, misurare nel senso di confrontare gli effetti delle alternative. In questo caso l'autore propone una definizione che tiene in considerazione la misura degli effetti attraverso un insieme di indicatori specifici, capaci di evidenziare i punti di forza e le criticità dell'insieme delle alternative. Ancora, Stame in (Stame, 1998) afferma che valutare significa analizzare se un'azione intrapresa per uno scopo corrispondente ad un interesse collettivo abbia ottenuto gli effetti desiderati o altri ed esprimere un giudizio sullo scostamento che normalmente si verifica per proporre eventuali modifiche che tengano conto delle potenzialità manifestatesi. Lombardo in (Lombardo, 1995) richiama l'uso di metodologie di aiuto alle decisioni basate su tecniche multi-criteria, derivato dallo studio dei legami fra valutazione e misurazione. I sistemi di supporto alle decisioni possono favorire la concertazione delle politiche di pianificazione, strutturando ed organizzando il processo decisionale. I sistemi di supporto alle decisioni necessitano della specificazione delle diverse componenti del sistema: gli attori coinvolti, i punti di vista, gli elementi di significatività dei criteri, la presenza di vincoli ed in che modo prevedere gli effetti di una azione. La valutazione nasce all'interno del contesto decisionale e ne riproduce una rappresentazione semplificata per giungere ad un risultato riconosciuto come scientificamente valido e basato su opportuni criteri di scelta. Nijkamp in (Nijkamp & Van Delft, 1977) definisce l'attività di valutazione di un insieme di alternative progettuali come l'identificazione degli impatti generati da ogni intervento, finalizzata alla trasformazione in previsioni e giudizi sul livello di benessere di una collettività. Palumbo in (Palumbo, 2002) evidenzia come l'importanza della valutazione risieda nella crescente complessità sociale, che rende meno credibile la possibilità di conoscere e padroneggiare a priori tutti i fattori rilevanti per il successo di un intervento e di poterne precedere in maniera affidabile gli esiti. La valutazione, in quanto elemento di riduzione degli errori potenzialmente commessi in stato di incertezza, diventa una pratica strumentale indispensabile all'attività decisionale, attraverso la quale correggere e migliorare l'azione per rendere gli interventi più efficaci, efficienti e rilevanti (Bernardi & Ongaro Bertol, 1984).

1.2 LA VALUTAZIONE NEI SISTEMI COMPLESSI

Il significato del termine complesso, nel senso comune del termine, viene associato a tematiche che richiedono un'analisi particolarmente accurata e la cui risoluzione risulta di difficile proposizione ed elaborazione. Analizzando invece questo concetto nel rigoroso ambito della letteratura scientifica e tecnica, si evidenzia come lo studio della complessità, affrontato da studiosi appartenenti a diversi ambiti disciplinari sia scientifici che umanistici, abbia contribuito a generare incertezza sull'attribuzione di un significato corretto e condiviso e ne abbia invece prodotto una moltitudine dove la complessità non è sempre attribuibile alle stesse cause e i vari significati non sono sempre riconducibili ad una radice comune (Lapucci, 2010).

La completa comprensione di un sistema complesso non deriva dallo studio delle sue singole componenti, ma deriva dalla conoscenza delle interazioni tra le componenti stesse (Ottino, 2003). La complessità di un sistema può essere attribuita a diversi fattori, in primo luogo alla struttura del sistema stesso, caratterizzata dalla numerosità delle sue componenti, dalla loro variabilità e dalle relazioni non lineari che si generano tra le stesse; in secondo luogo può dipendere dal comportamento del sistema nel tempo e nei confronti dell'ambiente di riferimento, che insieme ne determinano la capacità di compiere transizioni fra diversi regimi o stati del sistema; in terzo luogo alle proprietà emergenti del sistema nel tempo. La dinamica di un sistema complesso, il suo comportamento, è inoltre il risultato derivato dall'interazione dei tre punti precedenti (Faggioni & Simone, 2011).

Una definizione generale, fornita nell'ambito dello studio dei sistemi complessi, fa riferimento all'imprevedibilità del comportamento del sistema definendo la complessità come quella proprietà di un sistema modellizzabile, suscettibile di mostrare dei comportamenti che non siano tutti predeterminabili anche se potenzialmente anticipabili da un osservatore intenzionale di questo sistema (Le Moigne, 1985). Una definizione analoga fa riferimento al concetto di sorpresa, ovvero alla capacità di un sistema di comportarsi in modo non previsto da un determinato osservatore (Casti, 1994).

Il sistema della valutazione, intesa come la misura di un fenomeno, non presenta elementi di complessità quando l'oggetto della valutazione viene misurato attraverso una sola grandezza e la sua misura avviene facendo uso di indicatori opportuni sulla base di quella dimensione

esclusiva (Bulgarelli, 1997). Un indicatore viene definito come un'espressione di natura qualitativa o quantitativa, che rappresenta attitudini o costrizioni relative al contesto sociale e che permette di apprezzare gli scenari da un punto di vista degli obiettivi (Roy, 1985). L'indicatore rappresenta lo strumento costruito per valutare e comparare delle azioni potenziali secondo uno specifico punto di vista. Un criterio è uno standard di giudizio o una regola che permette di valutare la desiderabilità delle alternative decisionali (Hwang & Yoon, 1981). La valutazione assume una natura complessa quando questa si associa a grandezze differenti, anche eterogenee tra loro e nasce la necessità di misurare e confrontare quelle grandezze sulla base di molteplici criteri. Nei problemi decisionali complessi partecipano attori che si fanno portatori di molteplici interessi ed esprimono le proprie preferenze sulla base di un insieme di criteri rispetto ai quali le alternative decisionali vengono valutate.

L'ammissione di un insieme di molteplici criteri nel processo di valutazione, introduce elementi complessi dovuti anche al fatto che questi possono essere conflittuali. Quando questo si verifica, il raggiungimento di un obiettivo da parte di un'alternativa, comporta nello stesso tempo l'allontanamento della stessa alternativa da un altro obiettivo, che rispetto al primo risulta conflittuale. Da questo deriva il fatto che la valutazione assoluta di un insieme di alternative decisionali, finalizzata a determinare la migliore alternativa capace di soddisfare l'intero sistema degli obiettivi, non può essere perseguita in un ambiente complesso nel quale la valutazione si basa su molteplici criteri. In questi casi occorre indirizzarsi verso forme di valutazione relativa, finalizzate ad individuare non l'alternativa che realizza il soddisfacimento completo nei confronti di tutti i criteri di valutazione, ma l'alternativa che riesce a raggiungere il compromesso migliore nel raggiungimento dei molteplici e contrastanti obiettivi.

1.3 LA VALUTAZIONE NEL SISTEMA DEI TRASPORTI

Le problematiche nel campo della pianificazione dei trasporti assumono frequentemente una connotazione complessa e multidimensionale, che giustifica lo sviluppo di una rete di relazioni tra le componenti del sistema oggetto dello studio e le componenti appartenenti agli altri sistemi con i quali questo interagisce. Nei processi decisionali che si sviluppano in questo ambito, si generano interazioni complesse tra i soggetti che intervengono nel processo decisionale. Coerentemente con la definizione di Bezzi in (Bezzi, 2003) questi vengono identificati nei soggetti che, attraverso le loro azioni concrete, definiscono il proprio ruolo concorrendo direttamente allo sviluppo del processo decisionale. In maniera specifica si possono identificare nelle figure del committente, del valutatore e degli attori sociali coinvolti. Il committente è il soggetto che richiede supporto al valutatore per lo svolgimento di un'attività decisionale. Questa richiesta di intervento si può realizzare in diversi momenti all'interno del processo decisionale, sia quando il processo è finalizzato ad individuare l'oggetto di una decisione che deve essere ancora presa, sia quando si devono valutare gli effetti di una decisione che è stata presa in precedenza. Nel primo caso, l'idea connessa all'oggetto del processo decisionale non è ancora ben definita nei dettagli e si può sviluppare secondo modalità differenti; nel secondo caso la valutazione si basa su un insieme di scenari alternativi, costruiti per presentare ai soggetti decisionali la struttura e le caratteristiche delle soluzioni che devono essere confrontate. La funzione del valutatore è quella di attuare il processo valutativo in modo diretto, attraverso gli opportuni metodi derivati dalle proprie conoscenze tecniche e scientifiche. Il valutatore è una figura che nel processo di valutazione deve svolgere un ruolo neutrale, senza privilegiare o sfavorire una particolare soluzione rispetto ad un'altra. Ma dal momento che lui stesso è dotato di un proprio sistema di valori, la sua stessa presenza rischia di perturbare il processo e di condizionarne l'esito. Per questo motivo il valutatore deve possedere caratteristiche tali da consentirgli di interagire con gli altri attori, ricevere da questi la conoscenza riguardo l'oggetto della valutazione e utilizzare gli strumenti e metodi operativi per giungere ad una valutazione libera da eventuali conflitti di interesse. I soggetti con cui il valutatore interagisce sono gli attori sociali coinvolti nel processo valutativo, denominati stakeholders, termine che indica le figure che hanno un interesse in gioco. Gli stakeholders condizionando tutte le fasi del percorso decisionale e il loro ruolo attivo consente al processo di valutazione di arrivare a risultati riconosciuti validi da tutti gli attori sociali, in quanto l'esito finale è stato raggiunto anche grazie

al loro contributo. Occorre specificare che il committente e gli stakeholders devono partecipare al processo senza condizionarne in modo forzato l'esito, indirizzando la scelta verso una specifica direzione. Questi attori devono partecipare attivamente al processo non con la volontà di avanzare imposizioni ma presentando desideri e istanze con lo scopo di indurre il valutatore ad acquisire un quadro consapevole su tutti gli impatti che un intervento determina

Queste interazioni possono essere modellate attraverso una loro rappresentazione che permette di semplificare la complessità del fenomeno reale. L'attività di riduzione del livello di complessità diventa possibile individuando le informazioni principali che devono essere considerate nel processo valutativo e la fonte delle informazioni stesse. Le interazioni che si sviluppano tra i soggetti non sono sempre elementari e governate dalla logica, per cui l'attività di modellazione del processo valutativo, che passa attraverso la traduzione delle attività relazionali nella struttura analitica di un algoritmo, assume la caratterizzazione di un processo complesso.

La presenza di molteplici criteri di valutazione, che traducono i diversi obiettivi anche contrastanti tra loro, non permette di risolvere il problema decisionale riducendolo alla ricerca della soluzione ottima di una sola funzione obiettivo. Nelle problematiche complesse, governate da molteplici obiettivi, la soluzione ottima non risulta quella ottenuta dalla massimizzazione o dalla minimizzazione di un'unica funzione obiettivo, ma è identificata in quella soluzione che raggiunge il miglior compromesso nel soddisfare le molteplici istanze presentate dal soggetto decisionale e da tutti i portatori di interesse. Il processo di scelta non è finalizzato pertanto a trovare la soluzione ottima capace di soddisfare tutti i criteri, che rappresenta una soluzione ideale non realizzabile quando in un contesto decisionale multiattore i criteri di valutazione sono numerosi e conflittuali. Il processo decisionale sarà finalizzato a determinare quelle soluzioni in grado di raggiungere il rendimento mediamente migliore, rispetto ai molteplici obiettivi. Tutte le alternative devono essere confrontate sulla base dei criteri di scelta e ciascuna alternativa avrà, rispetto ad ogni criterio, uno specifico rendimento in riferimento agli obiettivi del progetto (Ortúzar & Willumsen, 2011). Queste problematiche vengono rappresentate attraverso modelli di analisi multi-criteria, che rappresentano una integrazione dell'analisi benefici costi in quanto attraverso questi modelli è possibile considerare nel processo decisionale ulteriori dimensioni oltre a quella economica, consentendo di tenere conto di quegli obiettivi che non sono monetizzati o monetizzabili (Fadda, 2002).

L'attività di valutazione nel settore dei trasporti è integrata con le fasi di programmazione, progettazione ed intervento e pertanto interessa sia le azioni volte a perseguire gli obiettivi prefissati negli strumenti di pianificazione dal carattere generale, sia le azioni operative legate alla fase esecutiva di un programma o di un progetto (Las Casas, 1997). La valutazione deve essere intesa come una comparazione fra alternative da cui scaturisce una scelta finale od un ordinamento. Nel primo caso viene individuata una soluzione che risulta preferibile rispetto alle altre, sulla base di una serie di obiettivi che devono essere conseguiti, nel secondo occorre individuare una scala di priorità di intervento, ossia ordinare le alternative in un elenco gerarchico, da quelle che occorre attuare con maggiore priorità a quelle che occorre attuare con minore priorità. Nel primo caso alcune scelte vanno escluse a vantaggio di altre, nel secondo caso tutte le alternative devono essere attuate, anche se in tempi diversi. La presenza di vincoli è alla base dell'impossibilità pratica di pervenire a risultati che ottimizzano le aspettative di tutti i gruppi, così che diventa obbligo cercare soluzioni di compromesso accettabili, attraverso una adeguata valutazione dei possibili impatti (Fusco, Nijkamp, & Voogd, 1989).

La valutazione può essere eseguita attraverso diverse tecniche. In (Bezzi, 2003) si fa riferimento a tecniche che utilizzano dati statistici o risultati di indagini ottenute tramite somministrazione di questionari o interviste, effettuate sia direttamente che a distanza, per esempio utilizzando una piattaforma internet. In particolare, una prima tecnica si basa sul giudizio espresso sulla base di indicatori costruiti a partire da dati statistici. La misura può essere espressa attraverso dati quantitativi o qualitativi. Una seconda tecnica viene effettuata interrogando direttamente i principali attori che risultano direttamente interessati dalla realizzazione dell'intervento, cioè quelli che ricevono direttamente un beneficio oppure un danno. Questa attività prevede indagini condotte con lo scopo di richiedere un giudizio su un programma, un progetto o un intervento. Dal momento che l'entità delle risorse a disposizione per lo svolgimento delle indagini non consentono sempre di interrogare tutti i soggetti interessati, una terza tecnica prevede il coinvolgimento di un piccolo gruppo di esperti.

Particolari aspetti di questa rappresentazione riguardano l'attribuzione del livello di importanza agli obiettivi considerati e la valutazione dei vincoli presenti nel sistema. La specificazione dell'importanza relativa dell'insieme dei criteri, avviene attraverso l'introduzione di opportuni schemi di ponderazione che rappresentano l'importanza assegnata a ciascun criterio, sulla base delle preferenze espresse dai soggetti decisionali. I vincoli si traducono attraverso limiti soglia e

limiti alle scale di valutazione che consentono di fissare le regole che il soggetto decisionale impone al processo di selezione. Questi possono corrispondere a soglie definite sulla base di regole o esperienza acquisita sul problema e consentono di scartare alternative non accettabili. Variabili aggiuntive che non corrispondono ai criteri, ma che il decisore potrebbe voler porre sotto vincolo, vengono generalmente definite variabili interne. I vincoli di natura fisica e pratica presenti nel sistema possono essere considerati introducendo opportuni valori di soglia sia nelle variabili controllabili che in quelle non controllabili.

2. L'ANALISI MULTI-CRITERIA

2.1 INTRODUZIONE

Un'analisi basata su criteri multipli ha come scopo quello di contribuire allo sviluppo di un processo di apprendimento che alimenta lo stesso processo decisionale (Las Casas, 1996), attraverso una procedura di comparazione tra alternative appartenenti ad un insieme decisionale. Le tecniche a criteri multipli introdotte nell'ambito di un processo decisionale permettono di fornire supporto ad un soggetto a cui è demandato il compito di compiere un'azione decisionale, rivolte alle molteplici opzioni appartenenti ad un insieme decisionale di alternative. La scelta finale si realizza sulla base del confronto tra le prestazioni che queste alternative raggiungono in corrispondenza di un insieme di criteri di valutazione predefiniti.

Il passaggio da un'analisi di tipo monodimensionale ad un'analisi multidimensionale avviene analizzando tutte le informazioni, tutte le conseguenze e soprattutto tutte le prospettive collegate ad una possibile scelta nel soddisfacimento dei criteri prestabiliti, che devono essere considerate e valutate dal decisore. Roy e Bouyssou in (Roy & Bouyssou, 1993) definiscono il concetto di aiuto alle decisioni come quella attività svolta da un soggetto che, prendendo come appoggio modelli chiaramente esplicitati, ma non necessariamente formalizzati, aiuta ad ottenere degli elementi di risposta alle domande che si pone colui che interviene in un processo di decisione, elementi che concorrono a chiarire la decisione e normalmente a prescrivere, o semplicemente favorire, un comportamento di natura tale da accrescere sia la coerenza

nell'evoluzione del processo, sia gli obiettivi ed il sistema dei valori a servizio dei quali colui che interviene nel processo decisionale è posto. Malczewski in (Malczewski, 1999) propone una definizione che integra e completa quella di Roy, considerando l'aiuto alla decisione come un insieme di procedure sistematiche per analizzare i problemi decisionali complessi. La strategia di base è quella di dividere il problema decisionale in tappe concise e comprensibili, di analizzare ogni parte e di integrarle in modo logico per produrre una soluzione sensata. In definitiva, l'elemento innovativo introdotto dall'aiuto alle decisioni multi-criteria, definito proprio da Roy come una rivoluzione copernicana nella maniera di pensare la ricerca operativa (Roy, 1979) consiste nell'abbandono del paradigma dell'ottimalità a favore del compromesso ottimale in cui non si ricerca un risultato unico, ma sono individuati quegli elementi che servono a chiarire le priorità su cui basare le scelte (Las Casas, 1996).

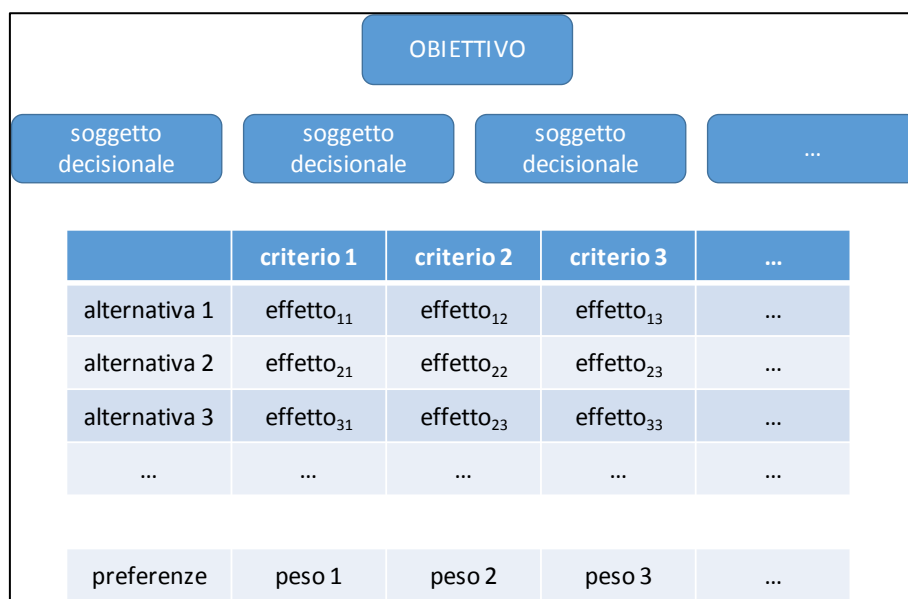


Figura 1 Rappresentazione degli elementi di un problema di aiuto alle decisioni (Malczewski, 1999)

La struttura generale di una tecnica di analisi multi-criteria considera un insieme A di alternative decisionali $A=\{a_1, a_2, \dots, a_i\}$ con $i \in N^+$. L'attività decisionale si basa sugli effetti delle alternative nei confronti di un insieme C di molteplici criteri di valutazione $C=\{c_1, c_2, \dots, c_i\}$ con $i \in N^+$, che possono essere anche conflittuali tra loro, cioè il raggiungimento di un obiettivo da parte di un'alternativa può comportarne il contemporaneo allontanamento da un altro obiettivo.

L'espressione formale di un criterio è una funzione a valori reali, definita sull'insieme A delle azioni decisionali in modo tale che sia possibile descrivere il risultato della comparazione di due alternative a_1 e a_2 appartenenti all'insieme decisionale, a partire dai valori $g(a_1)$ e $g(a_2)$ che esprimono gli effetti che le alternative registrano in corrispondenza di ciascun criterio (Roy & Bouyssou, 1993). Dal momento che le preferenze del soggetto decisionale possono interessare i diversi criteri in misura diversa, a ciascuno di essi viene assegnato un parametro numerico w_j che rappresenta il peso o l'incidenza che assume ogni criterio rispetto alla valutazione complessiva.

La struttura generale di un'analisi multi-criteria si può articolare nelle seguenti fasi generali:

- Specificazione delle alternative appartenenti all'insieme decisionale;
- Specificazione del sistema delle funzioni obiettivo;
- Costruzione della matrice decisionale;
- Confronto tra le prestazioni delle alternative per ciascuna funzione obiettivo;
- Individuazione delle alternative di miglior compromesso.

Si può parlare propriamente di prendere una decisione quando il soggetto decisionale elabora una scelta avendo di fronte una serie di opzioni. La prima fase consiste nel considerare un insieme di alternative equiprobabili appartenenti ad un insieme decisionale. Tutte le alternative devono avere uguale probabilità di realizzarsi, pertanto non devono esistere ostacoli alla realizzazione di un'alternativa rispetto ad un'altra. La specificazione del sistema delle funzioni obiettivo consiste nell'articolare gli obiettivi in una serie di funzioni obiettivo, derivate dal sistema delle preferenze che i soggetti decisionali hanno espresso. Il sistema degli obiettivi viene tradotto in un insieme di funzioni obiettivo a valori reali, continui o discreti, che consentono di misurare le prestazioni o gli effetti di ogni alternativa nei confronti di ciascuna funzione obiettivo. In funzione del sistema di obiettivi adottato, le funzioni obiettivo possono essere raggruppate in aree di meta, che rappresentano classi omogenee rappresentative delle finalità assegnate al progetto dai diversi soggetti coinvolti nel processo decisionale. Le funzioni obiettivo devono essere misurabili, non ridondanti ed esaustive; misurabili in quanto requisito fondamentale per avere un riscontro oggettivo dell'alternativa sull'obiettivo, non ridondanti per non sopravvalutare una specifica area di meta rispetto ad un'altra ed esaustive del sistema di obiettivo che rappresentano. La matrice decisionale è una matrice che rappresenta l'insieme

delle alternative, le funzioni obiettivo e dove il singolo elemento rappresenta l'effetto di ciascuna alternativa nei confronti di ogni singolo criterio. Dal momento che in un'analisi multi-criteria possono essere trattati dati di natura dimensionale differente, il passaggio di costruzione della matrice decisionale precede quello di normalizzazione dei valori della matrice, che consente di effettuare la successiva fase di confronto delle alternative, sulla base dei valori omogenei normalizzati che rappresentano le prestazioni che raggiungono nei confronti di ogni singolo criterio. L'attività di confronto tra le prestazioni delle alternative per ciascuna funzione obiettivo avviene sulla base di specifici algoritmi di calcolo, in grado di tradurre il raggiungimento degli obiettivi da parte delle alternative dell'insieme decisionale, in una funzione sintetica che registra la soddisfazione che riceve il decisore quando sceglie un'alternativa rispetto ad un'altra, propria di ciascun algoritmo di analisi multi-criteria. Sulla base del livello di soddisfazione raggiunto saranno individuate quelle alternative capaci di raggiungere il compromesso migliore nel raggiungere i molteplici e contrastanti obiettivi.

2.2 LE PRINCIPALI PROBLEMATICHE

Nei processi decisionali che si sviluppano in un sistema complesso, sono generalmente coinvolti molteplici decisori che basano il loro giudizio su criteri multipli. Interagiscono nel processo differenti aspetti di natura tecnica, economica, sociale, politica e ambientale, anche contrastanti e non riferibili ad un'unica unità di misura omogenea e riferibili a scale cardinale e nominali. I soggetti decisionali devono tenere conto dei molteplici punti di vista e scegliere una o più alternative che soddisfano meglio delle altre alternative tutti i criteri eventualmente in conflitto tra loro (Belton & Stewart, 2002). Questo meccanismo conduce, nei problemi complessi, ad abbandonare il concetto di ottimizzazione finalizzata a raggiungere l'alternativa migliore, per adottare uno schema valutativo a criteri multipli, indirizzato ad individuare quali alternative, tra quelle presenti nell'insieme decisionale, soddisfano un certo numero di standard esplicitamente definiti (Herbert, 1960). Esistono due momenti fondamentali nello sviluppo delle tecniche di analisi multi-criteria: l'individuazione degli obiettivi e l'attribuzione a questi di un'importanza relativa (Fadda, 2002). Il primo momento riguarda l'articolazione degli obiettivi in un insieme di criteri. I criteri vengono espressi in una forma tale che il progresso nella direzione dell'obiettivo o l'allontanamento da esso risulta misurabile in termini di unità di misura. La misura della rispondenza dell'alternativa a ciascuno dei criteri considerati può essere di natura quantitativa

o qualitativa, di tipo cardinale, ordinale o nominale. Nella valutazione a criteri multipli non si è obbligati a ricondurre le valutazioni ad una unità di misura omogenea ma nella stessa matrice decisionale possono essere considerati criteri valutati attraverso misure di rispondenza cardinali, ordinali e nominali, qualitative e quantitative. Il secondo momento richiede di tradurre le diverse istanze presentate dai portatori di interessi, in pesi che rappresentano l'importanza relativa a cui le soluzioni devono rispondere. In questo il vantaggio dell'utilizzo di un'analisi multi-criteria, a supporto di un processo decisionale, consiste nella rappresentazione della valutazione delle preferenze dei soggetti decisionali attraverso l'assegnazione di un ordine di priorità agli obiettivi.

L'applicazione dell'analisi multi-criteria permette di determinare l'insieme delle soluzioni di miglior compromesso che risulta strettamente dipendente dallo schema di pesatura adottato per le funzioni obiettivo. La traduzione delle istanze dei portatori di interesse nei valori numerici, che rappresentano i pesi attribuiti a ciascun criterio, è un'operazione che può introdurre errori di attribuzione delle soglie di importanza, da parte del valutatore. Per questo motivo è di fondamentale importanza prevedere, a valle dell'attività di scelta attraverso la determinazione della soluzione di miglior compromesso secondo lo schema di pesatura adottato, una ulteriore fase di sensibilità, durante la quale viene verificato come la variazione dello schema di pesatura, possa influenzare la scelta finale. L'analisi di sensitività, introdotta nell'ambito di una analisi a criteri multipli, si basa sulla variazione dello schema di pesatura dei singoli criteri. La scelta finale si definisce robusta quando questi cambiamenti non influenzano in modo significativo l'output del modello; se invece una piccola variazione del peso dei criteri modifica in modo sostanziale gli output, occorre ridefinire gli obiettivi ed i criteri del problema decisionale.

I metodi di analisi multi-criteria si distinguono nella letteratura scientifica in due gruppi (Zimmermann, 1996). Fanno parte del primo gruppo i metodi denominati multi-obiettivo (Multi-Objective Decision Making, MODM), quando la finalità è quella di risolvere una problematica decisionale la cui soluzione appartiene ad uno spazio continuo. Fanno parte del secondo gruppo i metodi denominati multi-attributo (Multi-Attribute Decision Making, MADM) quando invece la soluzione ottima è da determinarsi all'interno di un set discreto di alternative. Nel corso del presente lavoro di tesi saranno affrontate nello specifico problematiche relative al campo dei trasporti, dove l'attività decisionale è orientata verso un set discreto di alternative, per cui si farà uso di questo secondo gruppo di metodi.

Specificato il limite numerico alle alternative verso cui è orientata l'attività decisionale negli ambiti indagati nel corso del presente lavoro di ricerca, è possibile inquadrare le metodologie di analisi multi-criteria anche nei confronti della natura della problematica affrontata. Generalmente nella letteratura scientifica si riconoscono tre generi diversi di problematiche che è possibile affrontare e risolvere con una metodologia di analisi multi-criteria (Meyer & Roubens, 2005) (Figueira, Mousseau, & Roy, 2005):

- Problematiche di scelta;
- Problematiche di classificazione;
- Problematiche di gerarchizzazione.

Nelle problematiche di scelta, dato un insieme di alternative decisionali, l'obiettivo del problema è quello di individuare un sottoinsieme di alternative di miglior compromesso. Il risultato dell'analisi consiste nell'individuare, se esistono, una o più alternative che sono capaci di soddisfare, meglio delle altre, i molteplici obiettivi prefissati. L'obiettivo delle problematiche di classificazione è quello di raggruppare tutte le alternative appartenenti all'insieme decisionale in classi o categorie omogenee per determinate condizioni imposte. Può per esempio essere definita la categoria delle alternative preferibili, quella delle alternative non preferibili e quella delle alternative che richiedono un approfondimento maggiore. Nelle problematiche di gerarchizzazione, l'obiettivo è invece quello di ordinare le alternative appartenenti all'insieme decisionale secondo un ordine gerarchico, per esempio da quella che soddisfa meglio delle altre alternative le funzioni obiettivo a quella che le soddisfa meno, o viceversa (Olteanu, Bisdorff, & Meyer, 2011).

2.3 UN APPROCCIO METODOLOGICO PER LA PROGRAMMAZIONE DELLE AZIONI DI PIANO

La complessità che caratterizza molte delle problematiche che interessano il sistema territoriale e quello dei trasporti, rende necessario adottare un approccio valutativo di tipo integrato e partecipato; integrato in quanto capace di considerare gli impatti che le diverse alternative progettuali, oggetto dell'attività decisionale, generano nei diversi settori di riferimento, partecipato in quanto in grado di coinvolgere i diversi settori della società nei processi decisionali. Questi aspetti richiedono di condurre il processo valutativo secondo un approccio basato sulle metodologie di analisi a criteri multipli.

I molteplici soggetti coinvolti nel processo decisionale, portano interessi variegati articolati, nello sviluppo delle analisi multi-criteria, in un sistema di obiettivi utilizzati come elementi di valutazione delle diverse alternative. In un'ottica di valutazione a criteri multipli, l'obiettivo è quello di individuare quali alternative appartenenti all'insieme decisionale sono in grado di soddisfare meglio le aspettative e i bisogni del soggetto decisionale e dei portatori di interesse, articolati in un sistema di obiettivi preposti alla base del modello.

Mediante l'utilizzo dei metodi di analisi multi-criteria, è possibile definire la struttura di un sistema che permette di arrivare ad una soluzione basata su parametri oggettivi (Wind & Saaty, 1980), (Zeleny, 1982), (Roy, 1985), sviluppando il processo decisionale attraverso un percorso in grado di valutare le possibili strategie di intervento per la programmazione delle azioni di Piano e dei progetti che interessano il sistema dei trasporti. Occorre implementare le analisi multi-criteria in un sistema di supporto alle decisioni che supporti l'attività del soggetto decisionale e gli fornisca un metodo che lo conduca a prendere una scelta basata su criteri di valutazione oggettivi. Strutturare un processo decisionale secondo un approccio integrato attraverso un'analisi multi-criteria, significa affrontare la complessità del sistema individuando una struttura metodologica di riferimento articolata in diverse fasi, tale da definire un approccio metodologico finalizzato alla risoluzione del procedimento valutativo.

In questo ambito, le valutazioni espresse attraverso le analisi multi-criteria tengono conto degli aspetti eterogenei e conflittuali dei problemi complessi propri del processo di pianificazione strategica di un sistema dei trasporti, consentendo di effettuare un controllo sul perseguimento

degli obiettivi espressi dai diversi attori sociali, coinvolti nell'analisi in modo diretto ed indiretto. L'approccio multidimensionale e multiobiettivo può, infatti, consentire di effettuare un'analisi secondo diversi punti di vista contemporaneamente, comprensivo degli effetti ambientali, degli impatti sociali e di quelli economici, in una visione integrata (Voogd, 1983).

Si propone pertanto la definizione di un sistema di supporto alle decisioni che raggiunga la finalità di assistere i soggetti decisionali nelle attività di gestione e controllo del sistema dei trasporti, in grado di identificare criticità e individuare gli elementi sui quali programmare le azioni di Piano. Con la finalità di delineare un approccio integrato per la programmazione e la scelta degli interventi, la cui realizzazione consente di raggiungere gli obiettivi preposti sul sistema dei trasporti e della mobilità, tenendo conto delle possibili relazioni di reciprocità tra gli elementi strategici dello sviluppo del territorio e le strutture organizzative e finanziarie che ne assicurano l'attuazione, è possibile definire un percorso decisionale caratterizzato dagli elementi descritti nel seguito. L'operazione preliminare riguarda la definizione degli obiettivi, attraverso un'azione di concertazione messa in opera tra il valutatore, il soggetto decisionale e i portatori di interesse coinvolti nel processo. Occorre inquadrare la problematica di analisi, con riferimento alla possibilità che il problema decisionale sia indirizzato per esempio alla scelta di una, tra un insieme di possibili azioni, oppure che riguardi il loro raggruppamento in classi omogenee o ancora che l'obiettivo sia quello di una loro gerarchizzazione per priorità. Alla base del modello viene definito l'insieme decisionale di alternative e l'insieme dei criteri di valutazione, dove la valutazione viene eseguita attraverso il confronto tra la misura degli impatti diretti, indiretti ed indotti, determinati dagli interventi. L'applicazione della metodologia di analisi multi-criteria condurrà alla definizione della scelta finale e ad una sua giustificazione oggettiva sulla base di un percorso dove valutatore, soggetto decisionale e portatori di interesse hanno svolto un ruolo attivo.

- Definizione degli obiettivi attraverso un'azione di concertazione che il Valutatore avvia con il soggetto Decisionale e gli Stakeholders;
- Inquadramento del problema attraverso la caratterizzazione delle componenti ambientali, economiche e sociali interessate e l'interazioni tra queste ed il sistema territoriale;

- Inquadramento della problematica multi-criteria, con riferimento alla scelte delle alternative, alla loro classificazione o gerarchizzazione, che condizionerà la scelta della metodologia di analisi;
- Specificazione della metodologia di analisi multi-criteria, coerentemente con la precedente fase di inquadramento della problematica di analisi;
- Specificazione dell'insieme delle alternative. Per la selezione delle azioni di miglior compromesso è ragionevole considerare affrontare un percorso decisionale rivolto ad un numero finito di possibili alternative ed applicare gli strumenti decisionali di analisi multi criteria finalizzati alla risoluzione di problemi discreti.
- Articolazione degli obiettivi in un sistema di funzioni obiettivo, che considerino in modo esaustivo e non ridondante le istanze dei portatori di interesse;
- Valutazione degli effetti dell'insieme di alternative sul sistema degli obiettivi, attraverso la valutazione degli impatti diretti, indiretti ed indotti degli interventi individuati;
- Applicazione della metodologia di analisi multi-criteria con lo sviluppo dei passaggi richiesti dagli algoritmi specifici;
- Individuazione della scelta finale, ossia dell'alternativa di miglior compromesso o dell'insieme di alternative di miglior compromesso nelle problematiche di scelta, definizione delle classi nelle problematiche di classificazione e costruzione della gerarchia di miglior compromesso nelle problematiche di gerarchizzazione.

3. LE TECNICHE DI ANALISI

3.1 INTRODUZIONE

Nel presente capitolo sono descritte le tecniche di analisi multi-criteria utilizzate nell'ambito dei casi studio descritti nel capitolo 4 "Applicazioni". Le tecniche utilizzate abbracciano due differenti problematiche che si affrontano frequentemente nell'attività decisionale che interessa il settore dei trasporti:

- problematiche di scelta
- problematiche di gerarchizzazione.

Come visto nel paragrafo 2.2 "Le principali problematiche", le prime si pongono l'obiettivo di individuare, a partire dall'insieme decisionale di alternative, un sottoinsieme di alternative di miglior compromesso capaci di soddisfare i molteplici e contrastanti obiettivi. L'azione materiale si indirizzerà verso quell'azione o quelle azioni risultate di miglior compromesso.

Le seconde sono finalizzate ad creare un ordine gerarchico di alternative appartenenti all'insieme decisionale secondo un ordine gerarchico, per esempio da quella che soddisfa meglio delle altre alternative le funzioni obiettivo a quella che le soddisfa meno, o viceversa (Olteanu, Bisdorff, & Meyer, 2011). In questo caso tutte le azioni dovranno essere realizzate, seguendo un ordine temporale di priorità definito dalla gerarchia ottenuta.

Gli algoritmi delle tecniche presentate sono descritti nei loro passaggi fondamentali nei paragrafi successivi.

Nel paragrafo 3.2 “Analisi Concordante” viene descritta la metodologia di analisi multi-criteria proposta in (Giuliano, 1985). L’Analisi Concordante è un metodo di analisi multi-criteria funzionale alla risoluzione di problematiche di scelta. Dato un insieme di alternative equiprobabili, questo metodo individua un sottoinsieme di alternative definite di miglior compromesso, che sono in grado di soddisfare, meglio delle altre, le molteplici e contrastanti funzioni obiettivo. Una volta individuato il sottoinsieme di alternative di miglior compromesso, questo metodo non fornisce informazioni sulla diversa preferibilità delle diverse alternative appartenenti a questo, in quanto risultano tutte preferibili nella stessa misura rispetto alle altre non appartenenti al sottoinsieme. L’insieme delle alternative di miglior compromesso può essere costituito dall’insieme vuoto, in questo caso il modello indica che tra le alternative, nessuna è grado di rispondere meglio delle altre agli obiettivi prefissati. L’autore ha proposto questa metodologia nel settore della valutazione dei progetti di investimento nel campo dei trasporti (Giuliano, 1985) e la stessa è stata utilizzata anche per la valutazione delle prestazioni di una rete stradale urbana sotto i diversi aspetti del deflusso, dell’accessibilità e della sicurezza in (Fancello, Carta, & Fadda, 2014).

Nel paragrafo 3.3 “Analisi Concordante modificata con passaggio iterativo” viene proposta una modifica all’algoritmo dell’Analisi Concordante definito in (Giuliano, 1985) mediante l’introduzione di un passaggio iterativo che estende la funzionalità del metodo alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione. Attraverso questa modifica il metodo permette di costruire un elenco di alternative decisionali ordinato gerarchicamente, in funzione dell’insieme dei criteri di valutazione. Questo metodo è stato proposto ed applicato per la valutazione delle condizioni di sicurezza di un insieme di tronchi stradali omogenei in (Fancello, Carta, & Fadda, 2015).

Nel paragrafo 3.4 “Analisi Concordante modificata con valutazione della distanza” è stata proposta una ulteriore variazione alla metodologia dell’Analisi Concordante definito in (Giuliano, 1985). Le alternative dell’insieme di scelta non vengono considerate tutte ugualmente preferibili come nel modello originario, ma il metodo costruisce un ordine gerarchico in funzione della misura della distanza, per ogni alternativa, tra l’indice di dominanza della concordanza e l’indice di dominanza della discordanza, che danno una misura rispettivamente di quanto ciascuna

alternativa è preferibile alle altre per il raggiungimento degli obiettivi preposti e di quanto invece sono le altre alternative preferibili a questa. Anche questa seconda modifica proposta estende la funzionalità del modello dalla risoluzione di problematiche di scelta alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione.

Nel paragrafo 3.5 viene descritta la metodologia di analisi multi-criteria Electre III (Elimination Et Choix Traduisant la REalité III), sviluppata da Roy in (Roy, 1978) e finalizzata alla risoluzione delle problematiche di gerarchizzazione di un insieme di alternative decisionali. Questo metodo si basa sull'assunto che il soggetto decisionale possa esprimere, per ogni coppia di alternative, non solo una preferenza netta di una rispetto all'altra ma anche una preferenza debole o una situazione di incomparabilità (Tille and Dumont, 2003). Questo metodo è stato utilizzato per la selezione e il dimensionamento dei impianti energetici in (Papadopoulos & Karagiannidis, 2008) e nel contesto di quattro differenti casi studio in problemi ambientali in Finlandia in (Salminen, Hokkanen, & Lahdelma, 1998). Rogers in (Rogers & Bruen, 1998) ha presentato un lavoro sulla valutazione delle soglie di indifferenza, preferenza e veto, nell'ambito della valutazione dell'impatto delle emissioni acustiche in progetti sui trasporti. Roy in (Roy, Present, & Silhol, 1986) utilizza questo metodo per gerarchizzare le stazioni della metro di Parigi in modo da individuare quali devono essere scelte per la programmazione di interventi prioritari di ristrutturazione.

Nel paragrafo 3.6 viene descritto il metodo di analisi multi-criteria VIKOR (in Serbo: VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje). Questo metodo costruisce una gerarchia di miglior compromesso di un insieme di alternative decisionali, in relazione ad un insieme di criteri. Partendo dalla determinazione preventiva della matrice di decisione e dei pesi dei criteri, esso classifica le alternative in funzione dei valori che tre quantità scalari (S_i , R_i e Q_i) assumono per ciascuna di esse (Opricovic, 1998). Il metodo Vikor è stato usato nei centri educativi delle università in (Wu, Lin, & Chang, 2011), nel settore del processo di produzione di filati (Moghassem, 2013), per valutare la soddisfazione del cliente nella fornitura dei servizi di telefonia mobile (Kang & Park, 2014), in un problema di gerarchizzazione di materiali (Jahan & Edwards, 2013), e in una problematica di gerarchizzazione di prodotti dal design ergonomico in (Mohanty & Mahapatra, 2014),

Nel paragrafo 3.7 viene descritto il metodo Topsis (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution). Questo metodo è stato presentato in (Chen, Hwang, & Hwang, 1992), con riferimenti al lavoro di (Hwang & Yoon, 1981). L'idea alla base di questo metodo è che tra tutte le alternative appartenenti all'insieme decisionale, l'alternativa di miglior compromesso, che soddisfa meglio degli altri le funzioni obiettivo, deve avere la distanza minore dalla soluzione ideale migliore e la distanza maggiore dalla soluzione ideale peggiore. Dal momento che questo modello è funzionale alla risoluzione delle problematiche di gerarchizzazione, dove gli scenari non sono alternativi tra loro ma l'obiettivo del processo di scelta è quello di definire una gerarchia dove a ciascuno scenario è assegnato un ordine di priorità crescente, la gerarchia sarà assegnata in funzione di questa distanza. Questo metodo è stato utilizzato nella valutazione dei progetti delle strade in (Gardziejczyk & Zabicki, 2014), nel confronto tra imprese (Deng, Yeh, & Willis, 2000), nella valutazione della sicurezza stradale in (Bao, Ruan, Shen, Hermans, & Janssens, 2012).

3.2 ANALISI CONCORDANTE

La tecnica dell'analisi concordante è strutturata nelle seguenti fasi:

1. Specificazione delle alternative progettuali. Sia dato $A = \{a_i : i \in I\}$ un insieme di alternative progettuali oggetto del processo decisionale. Per lo sviluppo delle analisi di comparazione tra le alternative, queste devono essere comparabili fra loro ed equiprobabili, cioè tutte devono avere la stessa probabilità di verificarsi.
2. Specificazione del set di funzioni obiettivo. Sia dato $C = \{c_j : j \in J\}$ un insieme di funzioni obiettivo, queste rappresentano i criteri su cui si basa la valutazione delle prestazioni delle differenti alternative.
3. Definizione della matrice di valutazione. La matrice di valutazione è una matrice bidimensionale $n \times m$, dove le n righe rappresentano i criteri c_1, c_2, \dots, c_n , le m colonne le alternative a_1, a_2, \dots, a_m . e l'elemento generico p_{ij} rappresenta l'effetto che l'alternativa a_j assume in funzione del criterio c_i .

Tabella 1 - Matrice di valutazione

	a₁	a₂	...	a_j	...	a_m
c₁	p_{11}	p_{12}	...	p_{1j}	...	p_{1m}
c₂	p_{21}	p_{22}	...	p_{2j}	...	p_{2m}
...
c_i	p_{i1}	p_{i2}	...	p_{ij}	...	p_{im}
...
c_n	p_{n1}	p_{n2}	...	p_{nj}	...	p_{nm}

4. Normalizzazione della matrice di valutazione. Attraverso l'operazione di normalizzazione, i dati della matrice degli effetti, che possono avere natura differente, vengono resi omogenei ed uniformi attraverso funzioni logico-matematiche, trasformandoli in valori adimensionali compresi tra 0 ed 1, dove al valore 0 corrispondono gli effetti peggiori e al valore 1 corrispondono gli effetti migliori. In questo modo, tutte le componenti della matrice risultano espresse da valori adimensionali compresi tra 0 e 1, e risultano uniformi, in modo che ai valori

inferiori corrispondono, per ogni funzione obiettivo, gli effetti peggiori e ai valori superiori corrispondono gli effetti migliori. Se il dato corrisponde ad una funzione obiettivo per la quale sono preferibili i valori maggiori, viene normalizzato attraverso l'espressione (3.2.1).

$$r_{ij} = \frac{p_{ij}}{\max_k(p_{kj})} \quad (3.2.1)$$

Se invece il dato corrisponde ad una funzione obiettivo per la quale sono preferibili i valori inferiori, viene normalizzato attraverso l'espressione (3.2.2)

$$r_{ij} = 1 - \frac{p_{ij}}{\max_k(p_{kj})} \quad (3.2.2)$$

5. Individuazione del set di pesatura. Questa operazione consente di assegnare i pesi alle n funzioni obiettivo, in modo da attribuire un ordine di importanza tra i criteri stessi. Attraverso gli schemi di ponderazione dedotti dall'analista sulla base delle aspettative del soggetto decisionale, si traducono in forma analitica le aspettative del committente e della collettività. L'assegnazione dei pesi alle funzioni obiettivo è un passo molto delicato in quanto bisogna stabilire l'importanza relativa di ogni criterio; poichè il quadro decisionale è complesso, cioè sono presenti diversi decisori anche con preferenze conflittuali tra loro, per poter rappresentare tutti i punti di vista esistenti o, comunque, quelli più aderenti alla realtà, si possono utilizzare diversi schemi di ponderazione. Il vettore dei pesi, le cui componenti sono i pesi assegnati alle funzioni obiettivo, può essere determinato applicando una delle possibili tecniche a disposizione.

Alle funzioni obiettivo viene assegnato un valore numerico w_i , con $0 \leq w_i \leq 1$, $w_i \in \mathbb{R}$, con il vincolo che la somma dei pesi assegnati a tutte le funzioni obiettivo assuma un valore unitario, condizione espressa dall'espressione 3.2.3.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3.2.3)$$

6. Calcolo del campo della concordanza e del campo di discordanza. In questa fase è prevista la definizione di due campi di valori per ogni coppia di alternative j e j' , il campo di concordanza $C_{jj'}$ e il campo di discordanza $D_{jj'}$. Il campo di concordanza $C_{jj'}$ è costituito dall'insieme dei criteri i per i quali l'alternativa j ha prestazioni non inferiori all'alternativa j' .

$$C_{jj'} = \{i: r_{ij} \geq r_{ij'}\}, \forall j \neq j' \quad (3.2.4)$$

Il campo di discordanza $D_{jj'}$ è costituito dall'insieme dei criteri i per i quali l'alternativa j ha prestazioni non superiori all'alternativa j' .

$$D_{jj'} = \{i: r_{ij} \leq r_{ij'}\}, \forall j \neq j' \quad (3.2.5)$$

7. Calcolo degli indici di concordanza e di discordanza. Per ogni coppia di alternative j e j' , l'indice di concordanza $c_{jj'}$ è dato dalla sommatoria dei pesi dei criteri per i quali l'alternativa j offre prestazioni non inferiori all'alternativa j' .

$$c_{jj'} = \sum_{i \in C_{jj'}} w_i, \forall j \neq j' \quad (3.2.6)$$

Per ogni coppia di alternative j e j' , l'indice di discordanza $d_{jj'}$ si ricava dalla seguente relazione:

$$d_{jj'} = \sum_{i \in D_{jj'}} (w_i |p_{ij} - p_{ij'}| / \max(d) / m), \forall j \neq j' \quad (3.2.7)$$

$$\max(d) = \max(w_i \cdot |(p_{ij} - p_{ij'})|) \quad (3.2.8)$$

$$m = \text{numero di elementi in } D_{jj'} \quad (3.2.9)$$

8. Calcolo degli indici di dominanza della concordanza (Ic_i) e di dominanza della discordanza (Id_i) per ogni alternativa i . In questa fase vengono calcolati gli indici di dominanza della concordanza e di dominanza della discordanza. L'indice di dominanza della concordanza rappresenta la soddisfazione totale che riceve il decisore scegliendo l'alternativa A_i anziché quella A_j ed è dato dalla seguente espressione.

$$Ic_i = \sum_j c_{ij} - \sum_j c_{ji} \quad (3.2.10)$$

L'indice di dominanza della discordanza rappresenta la sconvenienza che sopporta il decisore nello scegliere l'alternativa A_i al posto dell'alternativa A_j ed è dato dalla seguente espressione:

$$Id_i = \sum_j d_{ij} - \sum_j d_{ji} \quad (3.2.11)$$

9. Individuazione delle soluzioni di miglior compromesso. Gli indici di dominanza della concordanza e della discordanza vengono aggregati in due vettori distinti, denominati vettore della concordanza e vettore della discordanza, i cui elementi rappresentano i valori di concordanza e discordanza di ogni alternativa rispetto a tutte le altre. Le informazioni racchiuse nella condizione di concordanza sono significativamente diverse da quelle fornite dalla condizione di discordanza, il che le rende complementari: la concordanza rappresenta le differenze tra i pesi dei criteri, mentre la discordanza rappresenta le differenze tra le prestazioni

delle alternative. Le soluzioni di miglior compromesso individuate dal metodo, saranno quelle che presenteranno un indice di dominanza della concordanza positivo e un indice di dominanza della discordanza negativo.

3.3 ANALISI CONCORDANTE MODIFICATA CON PASSAGGIO ITERATIVO

Viene presentata in questo paragrafo una proposta di modifica all'algoritmo dell'analisi concordante (Giuliano, 1985) per estendere la sua funzionalità alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione di un insieme di alternative. Il codice dell'algoritmo mantiene la sua struttura fino alla scelta dell'alternativa di miglior compromesso, una volta identificate la soluzione o le soluzioni di miglior compromesso, queste alternative vengono escluse dall'insieme decisionale e il procedimento viene reiterato in una procedura ricorsiva.

La prima iterazione dell'algoritmo ($k=1$) è condotta sull'insieme decisionale di alternative $A_1 = \{a_i\}$ e il metodo restituisce il sottoinsieme di alternative di miglior compromesso. Operativamente, sia *concord* la funzione algoritmo dell'analisi concordante, $A_1 = \{a_i\}$ l'insieme decisionale di alternative e $Z_1 = \{z_i\}$ il sottoinsieme di alternative di miglior compromesso, ottenuto a partire dall'applicazione del metodo sull'insieme decisionale $A_1 = \{a_i\}$. Nella prima iterazione si applica l'algoritmo dell'analisi concordante all'insieme decisionale A_1 e il metodo restituisce l'insieme Z_1 di alternative di miglior compromesso.

$$\text{concord}(A_1) = Z_1 \quad (3.3.1)$$

Le iterazioni successive k ($k = 2, \dots, n$), vengono eseguite su un sottoinsieme A_{k-1} dell'insieme decisionale A_k , tale che in ciascuna iterazione viene escluso dall'insieme decisionale il sottoinsieme di alternative risultate di miglior compromesso nell'iterazione precedente Z_{k-1} .

$$A_k = \{A_{k-1}/Z_{k-1}\}, 2 \leq k \leq n \quad (3.3.2)$$

La modifica proposta su questo metodo di analisi multi-criteria, consente di estendere la funzionalità del metodo, dalla risoluzione di problematiche di scelta alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione. D'altro canto non viene risolta la criticità che si presenta quando per nessuna alternativa il metodo restituisce un indice di dominanza della concordanza non negativo e contemporaneamente un indice di discordanza non positivo. In questo caso il metodo non determina quale rappresenta l'alternativa di miglior compromesso.

3.4 ANALISI CONCORDANTE MODIFICATA CON VALUTAZIONE DELLA DISTANZA

In questo paragrafo viene proposta una ulteriore modifica all'algoritmo dell'analisi concordante proposta in (Giuliano, 1985), anche in questo caso la proposta estende la funzionalità del metodo alla risoluzione delle problematiche di gerarchizzazione di un insieme di alternative decisionali. L'algoritmo mantiene la sua struttura originaria fino al passaggio che determina l'insieme di alternative di miglior compromesso. Una volta che la soluzione o le soluzioni di miglior compromesso sono state identificate in quanto quelle con indice di dominanza della concordanza non negativo ed indice di dominanza della discordanza non positivo, saranno preferibili alle altre quelle alternative che hanno la distanza maggiore tra indice di dominanza della concordanza e indice di dominanza della discordanza. Per ogni alternativa i di miglior compromesso, la distanza d_i tra indice di dominanza della concordanza ic_i e indice di dominanza della discordanza id_i è valutata come:

$$d_i = ic_i - id_i \quad (3.4.1)$$

Le alternative, ordinate per valori decrescenti della distanza d_i , formeranno la gerarchia di miglior compromesso, dall'alternativa che soddisfa meglio l'insieme di funzioni obiettivo a quella che li soddisfa peggio. La selezione delle alternative preferibili si basa quindi sulla massimizzazione della distanza tra gli indici di dominanza della concordanza e sulla minimizzazione di quelli di dominanza della discordanza, mentre l'eliminazione delle alternative meno favorevoli si effettua, come prevede il modello originario, considerando quelle alternative che assumono valori non positivi della dominanza della concordanza e non negativi della dominanza della discordanza.

3.5 ELECTRE III

La tecnica Electre III è strutturata nelle seguenti fasi:

1. Specificazione delle alternative progettuali. Sia $A = \{a_i; i \in I\}$ un insieme di alternative progettuali che rappresentano i differenti scenari oggetto del processo decisionale

2. Specificazione dell'insieme di pseudo criteri. Le alternative devono essere comparabili fra loro ed equiprobabili e vengono valutate sulla base di una famiglia di pseudo-criteri $g = \{g_j : j \in J\}$. Sulla scala E_j di ogni criterio g_j vengono definite 3 soglie: q_j, s_j, v_j rispettivamente di indifferenza, preferenza e veto.

$$0 \leq q_j \leq s_j \leq v_j \quad (3.5.1)$$

Ad ogni pseudocriterio g_j viene assegnato un peso $p = \{p_j : j \in J\}$ tale che

$$\forall j, 0 \leq p_j \leq 1, \sum_{j \in J} p_j = 1 \quad (3.5.2)$$

3. Calcolo dell'indice marginale di concordanza per ogni criterio. Per ogni coppia di alternative (a, a') e per ogni criterio j , l'indice marginale di concordanza è definito in base al confronto tra l'ampiezza degli scarti di valutazione $g_j(a)$ $g_j(a')$ e le soglie q_j ed s_j , distinguendo i casi in cui il criterio è crescente (all'aumentare dei valori del criterio migliora il giudizio sull'alternativa) e decrescente (all'aumentare dei valori del criterio peggiora il giudizio sull'alternativa).

Se il criterio è crescente

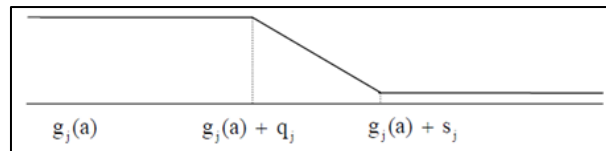


Figura 2 Electre III. Indice di concordanza - Preferenza dell'alternativa per criterio decrescente

Se la relazione seguente è soddisfatta, le alternative sono indifferenti

$$g_j(a') \leq g_j(a) + q_j \rightarrow c_j(a, a') = 1 \quad (3.5.3)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, l'alternativa a' surclassa l'alternativa a

$$g_j(a') \geq g_j(a) + s_j \rightarrow c_j(a, a') = 0 \quad (3.5.4)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, si procede ad una interpolazione e si può affermare che l'alternativa a' surclassa debolmente l'alternativa a .

$$g_j(a) + q_j < g_j(a') < g_j(a) + s_j \quad (3.5.5)$$

Considerando, ad esempio, tra le possibili interpolazioni, una interpolazione di tipo lineare, si avrà:

$$c_j(a, a') = \frac{s_j - (g_j(a') - g_j(a))}{s_j - q_j} \quad (3.5.6)$$

Se invece il criterio è decrescente

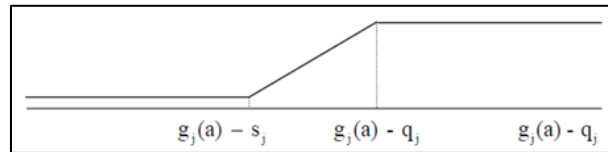


Figura 3 Electre III. Indice di concordanza - Preferenza dell'alternativa per criterio crescente

Se la relazione seguente è soddisfatta, le alternative sono indifferenti

$$g_j(a') \geq g_j(a) - q_j \rightarrow c_j(a, a') = 1 \quad (3.5.7)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, l'alternativa a' surclassa l'alternativa a

$$g_j(a') \leq g_j(a) - s_j \rightarrow c_j(a, a') = 0 \quad (3.5.8)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, si procede ad una interpolazione e si può affermare che l'alternativa a' surclassa debolmente l'alternativa a.

$$g_j(a) - s_j < g_j(a') < g_j(a) - q_j \quad (3.5.9)$$

Considerando una possibile interpolazione lineare, si avrà:

$$c_j(a, a') = \frac{s_j - (g_j(a') - g_j(a))}{s_j - q_j} \quad (3.5.10)$$

In questo modo si ottiene una matrice di concordanza per ognuno dei criteri considerati, gli elementi di ogni matrice sono i coefficienti di concordanza tra tutte le coppie di alternative, rispetto al criterio considerato.

4. Calcolo dell'indice marginale di discordanza per ogni criterio. Un ragionamento analogo viene svolto per il calcolo degli indici marginali di discordanza, con la differenza che in questo caso viene introdotta la soglia di veto.

Se il criterio è crescente

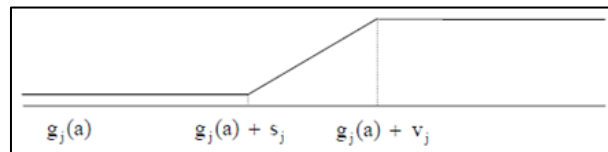


Figura 4 Electre III. Indice di discordanza - Preferenza dell'alternativa per criterio crescente

Se la relazione seguente è soddisfatta, le alternative sono indifferenti

$$g_j(a') \leq g_j(a) + s_j \rightarrow d_j(a, a') = 0 \quad (3.5.11)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, l'alternativa a non può surclassare l'alternativa a'

$$g_j(a') \geq g_j(a) + v_j \rightarrow d_j(a, a') = 1 \quad (3.5.12)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, si procede ad una interpolazione e si può affermare che l'alternativa a' surclassa debolmente l'alternativa a.

$$g_j(a) + s_j < g_j(a') < g_j(a) + v_j \quad (3.5.13)$$

Considerando una possibile interpolazione lineare, si avrà:

$$d_j(a, a') = \frac{(g_j(a') - g_j(a)) - s_j}{v_j - s_j} \quad (3.5.14)$$

Se invece il criterio è decrescente

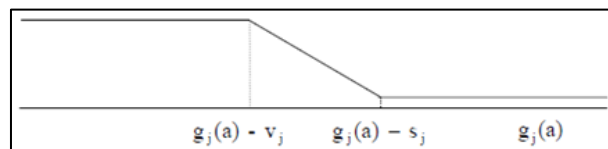


Figura 5 Electre III. Indice di discordanza - Preferenza dell'alternativa per criterio decrescente

Se la relazione seguente è soddisfatta, le alternative sono indifferenti

$$g_j(a') \geq g_j(a) - s_j \rightarrow d_j(a, a') = 0 \quad (3.5.15)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, l'alternativa a non può surclassare l'alternativa a'

$$g_j(a') \leq g_j(a) - v_j \rightarrow d_j(a, a') = 1 \quad (3.5.16)$$

Se la relazione seguente è soddisfatta, si procede ad una interpolazione e si può affermare che l'alternativa a' surclassa debolmente l'alternativa a.

$$g_j(a) - v_j < g_j(a') < g_j(a) - s_j \quad (3.5.17)$$

Considerando una possibile interpolazione lineare, si avrà:

$$d_j(a, a') = \frac{(g_j(a) - g_j(a')) - s_j}{v_j - s_j} \quad (3.5.18)$$

5. Calcolo dell'indice aggregato di concordanza. Una volta ottenute J matrici di concordanza e J matrici di discordanza, i cui elementi sono la somma ponderata, con i pesi inizialmente assegnati ai criteri, degli indici marginali di concordanza;

$$c(a, a') = \sum_{j \in J} p_j c_j(a, a') \quad (3.5.19)$$

A partire dalla matrice di concordanza aggregata e dalle singole matrici di discordanza si procede al calcolo della matrice di credibilità del surclassamento, i cui elementi sono così ottenuti:

$$\text{Se } \forall j : d_j(a, a') = 0 \rightarrow \delta(a, a') = c(a, a') \quad (3.5.20)$$

$$\text{Se } \exists j : d_j(a, a') > 0 \text{ allora} \quad (3.5.21)$$

$$\text{Se } d_j(a, a') < c(a, a') \rightarrow \delta(a, a') = c(a, a') \quad (3.5.22)$$

$$\text{Se } d_j(a, a') \geq c(a, a') \rightarrow \delta(a, a') = c(a, a') \times \prod_{j^* \in J^*} \left(\frac{1 - d_{j^*}(a, a')}{1 - c(a, a')} \right) \quad (3.5.23)$$

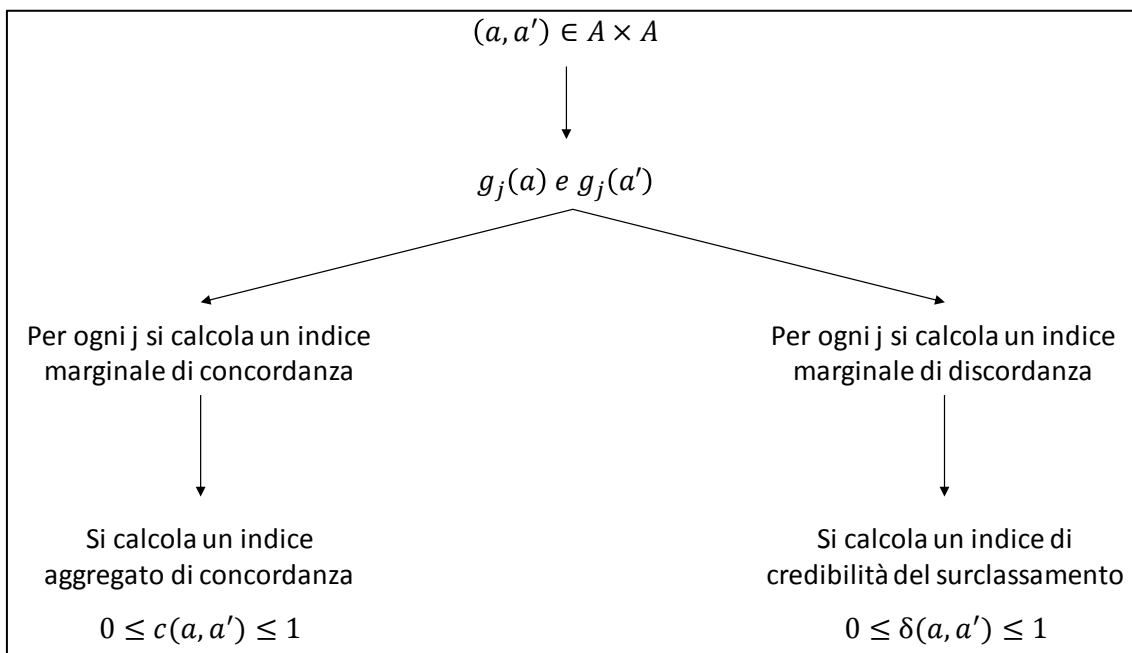


Figura 6 Electre III. Rappresentazione dei passaggi dell' algoritmo di calcolo

6. Calcolo dell'indice di credibilità del surclassamento. A questo punto si procede con la costruzione del preordine finale, ossia l'ordinamento globale delle alternative. A tal fine viene impiegato un algoritmo di distillazione, cioè la procedura di estrazione delle alternative dalla matrice di credibilità del surclassamento e di collocazione delle stesse in una graduatoria, che a partire dall'individuazione di una soglia di discriminazione $s(\delta)$ cioè la distanza massima tra due credibilità, in modo da essere ancora dello stesso ordine di grandezza, permette di estrarre dalla matrice di credibilità le alternative che entreranno a far parte dell'ordinamento. In realtà vengono applicati due algoritmi di distillazione, uno dall'alto, che estrae dalla matrice le alternative, dalla migliore alla peggiore, ed uno dal basso che le estrae invece dalla peggiore alla migliore. Si ottengono quindi due preordini; soltanto dall'intersezione di questi due preordini sarà possibile pervenire all'ordinamento finale. Per l'estrazione delle alternative si individua, nella matrice di credibilità del surclassamento, il grado di credibilità massimo δ_0 , pari a:

$$\delta_0 = \max_{(a,a') \in A_i} \delta(a,a') \quad (3.5.24)$$

cioè il massimo tra i valori $\delta(a,a')$ al passo i-esimo (A_i è la matrice di credibilità al passo i); esso determina un valore di credibilità tale che saranno considerati solo i valori di $\delta(a,a')$ che sono sufficientemente vicini a δ_0 . Si sottrae quindi la soglia di discriminazione $s(\delta)$ e si calcola δ'_0 .

$$\delta'_0 = \delta_0 - s(\delta) \quad (3.5.25)$$

E si calcola il primo livello di separazione δ_i , relativo all'insieme A_i :

$$\delta_i = \max_{(a,a') \in \Omega} \delta(a,a') \quad (3.5.26)$$

Dove

$$\Omega = \{(a, a') : \delta(a, a') < \delta'_0\} \quad (3.5.27)$$

E si definisce la qualificazione di ogni azione $q(a_i)$ come il numero di azioni che sono surclassate dall'azione a_i meno il numero di azioni che la surclassano, cioè

$$q(a_i) = p(a_i) - d(a_i) \quad (3.5.28)$$

Dove

$$p(a_i) = |\{a' \in A_i : \delta(a, a') > \delta_1 \text{ e } (\delta(a, a') - \delta(a', a)) > s(\delta)\}| \quad (3.5.29)$$

$$d(a_i) = |\{a' \in A_i : \delta(a, a') > \delta_1 \text{ e } (\delta(a', a) - \delta(a, a')) > s(\delta)\}| \quad (3.5.30)$$

L'algoritmo di distillazione dall'alto classifica le azioni in base alla qualificazione massima, secondo la regola:

$$q^+ = \max_{a_i \in A_i} q(a_i) \quad (3.5.31)$$

Ottenendo il seguente sottoinsieme di A_i :

$$D_1^+ = \{a_i \in A_i : q(a_i) = q^+\} \quad (3.5.32)$$

Dove D_1^+ sarà il primo distillato dall'alto, ed ogni classe C_i^+ sarà costruita partendo dall'alto su questo distillato. Qualora D_1^+ contenga soltanto una azione, si pone $C_1^+ = D_1^+$ e si ripete la procedura descritta finora sull'insieme delle azioni rimanenti per l'iterazione successiva, altrimenti si applica l'algoritmo all'insieme delle azioni di D_1^+ generando una sottodistillazione finchè esso non conterrà una sola azione. La procedura è ripetuta partendo da A_{i+1} e termina quando non c'è più alcun elemento dell'insieme A delle azioni che non sia stato attribuito ad una classe. Il risultato ottenuto è la distillazione dall'alto. Nella distillazione dal basso, il procedimento è simile al precedente però la selezione è effettuata in base alla qualificazione minima secondo la regola:

$$q^- = \min_{a_i \in A_i} q(a_i) \quad (3.5.33)$$

$$D_1^- = \{a_i \in A_i : q(a_i) = q^-\} \quad (3.5.34)$$

In questo caso D_1^- sarà il primo distillato dal basso e ciascuna classe C_1^- sarà costruita partendo dal basso. Ottenuti i due preordini $P(A)^+$ e $P(A)^-$ dagli algoritmi di distillazione, si procederà all'individuazione del preordine finale. Il procedimento proposto da (Scharlig, 1996) per definire un preordine finale è una intersezione, secondo il significato della teoria degli insiemi, che si basa sulle seguenti tre regole:

- Un'azione del preordine finale non può essere posta prima di un'altra se non nel caso in cui essa è prima di quest'ultima in uno dei due preordini $P(A)^+$ o $P(A)^-$ e prima di questa oppure ex aequo nell'altro;
- Due azioni non possono essere ex aequo nel preordine finale se non nel caso in cui appartengono alla stessa classe in entrambe le classificazioni dall'alto e dal basso;
- Due azioni sono incomparabili nel preordine finale se una è prima dell'altra in una classificazione e la segue nell'altra.

3.6 VIKOR

Il metodo VIKOR è strutturato nelle seguenti fasi:

1. Specificazione delle alternative progettuali. Sia dato $A = \{a_j : j \in J\}$ un insieme di alternative progettuali, che rappresentano i differenti scenari oggetto del processo decisionale. Per lo sviluppo delle analisi di comparazione tra le alternative, queste devono essere comparabili fra loro ed equiprobabili.

2. Specificazione dei criteri. Determinazione del valore migliore f_i^* e del valore peggiore f_i^- di ciascun criterio, $i=1, 2, \dots, n$. Se l' i -esimo criterio rappresenta un beneficio, $f_i^* = \max(f_{ij})$ e $f_i^- = \min(f_{ij})$ mentre se l' i -esimo criterio è un costo allora $f_i^* = \min(f_{ij})$ and $f_i^- = \max(f_{ij})$.

3. Calcolo dei valori di S_j e R_j , $j=1, 2, \dots, J$, attraverso le relazioni:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \quad (3.6.1)$$

$$R_j = \max_i [w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)] \quad (3.6.2)$$

dove w_i rappresenta il peso per il criterio i , che esprime l'importanza relativa del criterio i espressa dal soggetto decisionale e , ,.

4. Calcolare i valori Q_j , $j=1,2, \dots, J$, con J numero di alternativa, attraverso l'espressione seguente.

$$Q_j = v(S_j - S^*)/(S^- - S^*) + (1 - v)(R_j - R^*)/(R^- - R^*). \quad (3.6.3)$$

Dove $S^* = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^* = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$. Il parametro v può assumere valori compresi tra 0 e 1 e attribuisce un peso differente ai due addendi dell'espressione (3.6.3) di Q . Assumendo un valore di $v > 0,5$ si dà maggior peso al primo addendo e, dunque, alla risposta di ciascuna alternativa ai criteri visti nel loro complesso. Con $v < 0,5$, invece, si conferisce maggior peso al secondo addendo, quindi all'entità delle peggiori prestazioni offerte dalle alternative nei confronti dei singoli criteri. Quando si vuol dare uguale importanza ai due aspetti si pone, $v = 0,5$.

5. Gerarchizzazione delle alternative. La gerarchizzazione delle alternative si ottiene ordinando i valori di S , R e Q , in ordine decrescente. Come risultato si ottengono tre liste. Viene proposta come soluzione di compromesso l'alternativa ($A^{(1)}$) che risulta la migliore secondo la classifica per la misura Q (cioè quella con il valore minimo di Q) se le seguenti due condizioni di accettabilità sono soddisfatte.

Condizione 1: Vantaggio accettabile

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ. \quad (3.6.4)$$

Dove $A^{(2)}$ è l'alternativa con la seconda posizione nella lista per Q and $DQ = 1/(J-1)$

Condizione 2: Stabilità accettabile della decisione.

L'alternativa $A^{(1)}$ deve essere anche la migliore, ovvero presentare il valore minimo, nella classifica secondo la misura di S_i e/o di R_i .

Se una delle condizioni non è soddisfatta, allora non è possibile individuare in modo diretto la migliore soluzione, bensì è possibile individuare un set di soluzioni compromesso all'interno del gruppo di alternative preso in esame:

1. alternative $A^{(1)}$ and $A^{(2)}$ se solo la condizione C2 non è soddisfatta;

2. alternative $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)}$ se la condizione C1 non è soddisfatta e $A^{(M)}$ è determinate attraverso la relazione $Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)})$ per il massimo valore di M. Le alternative del set individuate sono, allora, caratterizzate da una sensibile “vicinanza” reciproca.

3.7 TOPSIS

La tecnica Topsis è strutturata nelle seguenti fasi:

1. Specificazione delle alternative progettuali. Sia dato $A = \{a_i : i \in I\}$ un insieme di alternative progettuali, che rappresentano i differenti scenari oggetto del processo decisionale. Per lo sviluppo delle analisi di comparazione tra le alternative, queste devono essere comparabili fra loro ed equiprobabili.

2. Specificazione del set di criteri. Sia dato $C = \{c_j : j \in J\}$ un insieme di funzioni obiettivo, che rappresentano i criteri di valutazione degli scenari.

3. Definizione della matrice di valutazione. La matrice di valutazione è una matrice bidimensionale $n \times m$, dove le n righe rappresentano i criteri c_1, c_2, \dots, c_n , le m colonne le alternative a_1, a_2, \dots, a_m . L'elemento generico p_{ij} rappresenta il punteggio che l'alternativa a_j assume in funzione del criterio c_i .

Tabella 2 - Matrice di valutazione

	a_1	a_2	...	a_j	...	a_m
c_1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1j}	...	p_{1m}
c_2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2j}	...	p_{2m}
...
c_i	p_{i1}	p_{i2}	...	p_{ij}	...	p_{im}
...
c_n	p_{n1}	p_{n2}	...	p_{nj}	...	p_{nm}

4. Normalizzazione della matrice di valutazione. Attraverso l'operazione di normalizzazione, i dati della matrice degli effetti, con natura differente, vengono resi omogenei ed uniformi. Ogni

elemento p_{ij} della matrice degli effetti viene trasformato in valore adimensionale r_{ij} , attraverso l'espressione:

$$r_{ij} = p_{ij} / \sum_{j=1}^J p_{ij}^2, j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, n \quad (3.7.1)$$

5. Calcolo della matrice decionale normalizzata pesata. Il valore v_{ij} normalizzato e pesato, è calcolato come:

$$v_{ij} = w_i \cdot r_{ij}, j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, n \quad (3.7.2)$$

Dove w_i è il peso dell' i -esimo obiettivo e deve essere soddisfatta la relazione

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3.7.3)$$

6. Determinazione della soluzione ideale A^* e la soluzione ideale negativa A^-

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}, \quad (3.7.4)$$

$$A^* = \{(max_j v_{ij} | i \in I^*), (min_j v_{ij} | i \in I^-)\}. \quad (3.7.5)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\}, \quad (3.7.6)$$

$$A^- = \{(min_j v_{ij} | i \in I^*), (max_j v_{ij} | i \in I^-)\}. \quad (3.7.7)$$

Dove I^* è l'insieme dei criteri che rappresentano un beneficio e I^- è l'insieme dei criteri che rappresentano un costo.

7. Calcolo della misura della distanza euclidiana D_j^* dalla soluzione ideale positiva secondo la seguente espressione:

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^*)^2}, j = 1, \dots, J \quad (3.7.8)$$

8. Nello stesso modo, la misura della distanza euclidiana D_j^- dalla soluzione ideale negativa secondo la seguente espressione:

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, j = 1, \dots, J \quad (3.7.9)$$

9. Calcolo della distanza relativa dalla soluzione ideale. La distanza relativa dall'alternativa A_j rispetto all'alternativa ideale A^* è definita dalla seguente espressione:

$$C_j^* = D_j^- / (D_j^* + D_j^-), j = 1, \dots, J \quad (3.7.10)$$

10. Creazione della gerarchia di miglior compromesso in funzione del valore della distanza relativa C_j^* . L'ordinamento delle alternative secondo valori decrescenti di C_j^* fornirà la gerarchia, dall'alternativa che soddisfa meglio l'insieme di criteri a quella che li soddisfa peggio.

4. APPLICAZIONI

4.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono presentati significativi casi studio dove un soggetto chiamato ad intraprendere un'azione decisionale nel settore della pianificazione dei trasporti, che nei casi descritti coincide con il soggetto gestore della rete di trasporto, utilizza l'approccio metodologico definito nei paragrafi precedenti per giungere ad una valutazione basata su un insieme di criteri oggettivi, risultato delle istanze che avanzano i portatori di interesse coinvolti nel processo di valutazione.

L'azione decisionale viene supportata da metodi di analisi a criteri multipli che permettono di valutare quali alternative rispondono meglio all'insieme dei molteplici e contrastanti criteri, posti alla base della problematica. La scelta del metodo specifico è dipesa dalla natura della problematica che viene posta. I casi applicativi presentati affrontano delle problematiche di scelta e di gerarchizzazione. La scelta si verifica quando occorre individuare una opzione, tra un insieme di opzioni possibili, capace di soddisfare mediamente meglio delle altre, i molteplici obiettivi. La necessità di fornire un ordine gerarchico invece si verifica quando è richiesta la programmazione temporale di una serie di interventi, per cui occorre assegnare alle diverse opzioni, un ordine di priorità.

Trattandosi di reali casi applicativi, la scelta dell'insieme dei criteri su cui si basa la valutazione delle alternative, è andata incontro a due esigenze principali. La prima riguarda la

rappresentazione del sistema di obiettivi posto a base delle analisi, gli obiettivi devono cioè rappresentare le istanze dei soggetti portatori di interesse. Altro elemento fondamentale riguarda l'applicabilità pratica. Trattandosi di reali casi applicativi, per determinare il loro valore in corrispondenza di ciascuna azione non devono essere richieste complesse indagini ed elaborazione, ma gli indicatori devono basarsi su dati che possibilmente sono già nelle disponibilità dell'amministratore della rete o che comunque risultano facilmente determinabili, per esempio attraverso rilievi geometrici e di traffico effettuati in situ o attraverso richieste agli uffici statici, per quanto riguarda i dati storici relativi all'incidentalità.

4.2 UN MODELLO INNOVATIVO PER LA VALUTAZIONE DELLE RETI STRADALI URBANE MEDIANTE INDICATORI SINTETICI DI PRESTAZIONE

Basato sul lavoro presentato in (Fancello, Carta, & Fadda, 2015)

4.2.1 Introduzione

L'obiettivo del caso studio presentato in questo paragrafo è quello di definire la struttura di un modello di supporto alle decisioni, basato su una metodologia di analisi a criteri multipli, finalizzata a confrontare le prestazioni di differenti scenari trasportistici, per determinare quello che soddisfa meglio i molteplici e contrastanti obiettivi di valutazione. Il modello è stato applicato ad un caso studio rappresentativo della valutazione della funzionalità di una porzione di rete stradale urbana. La valutazione ha interessato diversi aspetti ed è stata effettuata attraverso l'utilizzo di indicatori sintetici di prestazione. L'utilizzo di un modello capace di supportare l'attività di un soggetto decisionale si rende necessario nelle fasi di pianificazione e di gestione delle reti complesse di trasporto, quali appunto quelle stradali urbane. In queste attività, legate alla mobilità ed al funzionamento delle reti di trasporto, come l'organizzazione della viabilità, la gestione dei nodi, l'introduzione di nuovi assetti di circolazione, risulta utile disporre di strumenti di analisi che permettano di , confrontare scenari alternativi per giungere ad una scelta basata su criteri oggettivi. Coerentemente con quanto definito nelle conclusioni del lavoro presentato in (Fancello, Carta, Uccheddu, & Fadda, 2013), lavoro relativo allo stato dell'arte sui modelli di valutazione delle reti stradali urbane, l'obiettivo è quello di individuare una metodologia di analisi a basata su un insieme di indicatori sintetici di prestazione, rappresentativi di specifici aspetti che riguardano la funzionalità di una rete stradale urbana, in grado di fornire una valutazione sintetica sulla preferibilità dei diversi scenari. In questo contesto multiattore, la cui valutazione è basata su un insieme di molteplici criteri, l'utilizzo di una tecnica di analisi multi-criteria è risulta essere quella che meglio risponde a soddisfare la problematica in esame.

4.2.2 Metodologia

La metodologia di analisi a criteri multipli applicata al caso studio in esame, è quella dell'Analisi Concordante, così come descritta nel paragrafo 3.2. Questa metodologia permette di risolvere una problematica di scelta, dove a partire dall'insieme di alternative decisionali, si individua un

sottoinsieme di scelta costituito dalle alternative di miglior compromesso, in grado di raggiungere meglio delle altre alternative l'insieme dei molteplici obiettivi.

4.2.3 Selezione dei criteri

L'insieme degli indicatori definiti alla base del modello deve rappresentare gli obiettivi del problema sui quali si basa la valutazione delle diverse alternative. Nel presente caso applicativo l'esigenza è quella di confrontare le prestazioni globali raggiunte in corrispondenza di diversi scenari della rete. Gli indicatori dovranno perciò essere inquadrati all'interno dei principali ambiti operativi nei quali si registrano le prestazioni di una rete stradale urbana, già individuati nel lavoro (Fancello, Carta, Uccheddu, & Fadda, 2013). In quel precedente lavoro sono stati individuati tre ambiti operativi; in primo luogo la funzionalità dell'infrastruttura in termini di deflusso, ossia la sua capacità di far defluire regolarmente la corrente di traffico che vi transita; in secondo luogo il livello di accessibilità della rete, ossia la facilità con cui vengono raggiunte le destinazioni degli spostamenti; in terzo luogo risulta fondamentale considerare l'ambito relativo alla sicurezza, definito da quelle caratteristiche che influiscono sul livello di esposizione al rischio che la stessa rete determina nei confronti degli utenti. I criteri devono anche rispondere alle attese e agli impatti che l'utilizzo della rete di trasporto determina nei confronti delle componenti sociali sulle quali ricadono gli effetti generati dall'utilizzo dell'infrastruttura e dai nuovi interventi progettuali realizzati sulla stessa (Haghshenas & Vaziri, 2012). Queste componenti, raggruppate in aree di meta, sono rappresentate dagli utilizzatori dell'infrastruttura di trasporto, dai gestori della rete e dalla componente esterna che, pur non risultando direttamente interessata dall'utilizzo o dalla gestione del sistema di trasporto, ne subisce gli effetti. Poiché lo scopo del caso studio riportato è quello di valutare le prestazioni della rete di trasporto in riferimento agli specifici ambiti operativi riportati sopra, non viene effettuata un'analisi specifica sulla valutazione degli interessi della componente esterna al sistema.

Per ciascuna area di meta e per ciascuno degli ambiti operativi indicati, è stato specificato un criterio di valutazione rappresentativo, ossia l'indicatore in grado di quantificare il livello di prestazioni raggiunto da ciascuno scenario. L'elenco seguente descrive in modo puntuale gli indicatori utilizzati per l'analisi, specificando sia l'obiettivo della loro funzione, sia a quale area di meta e a quale ambito operativo sono relativi.

1. Area di meta: utenti del trasporto privato, ambito operativo: deflusso

Le prestazioni vengono definite in funzione del tempo speso dagli utenti per attraversare la rete, cioè il tempo di percorrenza dei rami e di attesa alle intersezioni; per determinare le migliori prestazioni occorrerà quindi minimizzare questo valore. Il relativo indicatore è dato dalla somma del tempo medio di percorrenza sui rami e di attesa alle intersezioni.

Prestazioni di deflusso - tempo percorrenza rete

- ℓ_i , lunghezza dell'arco i ;
- v_i , velocità media del flusso veicolare f_a sull'arco i , durante l'ora di punta;
- δ_j , tempo di ritardo medio per veicolo nell'intersezione j , durante l'ora di punta;

$$c_1 = \sum_i (\ell_i / v_i) + \sum_j (\delta_j) \quad (4.2.1)$$

2. Area di meta: utenti del trasporto privato, ambito operativo: accessibilità

Le prestazioni vengono misurate in funzione della distanza che un veicolo che si immette nella porzione di rete stradale dalla rete urbana circostante, deve percorrere per giungere ad un attrattore significativo interno alla porzione di rete stradale urbana considerata (nel caso specifico la stazione ferroviaria centrale di Benevento). Questo parametro avrà una direzione di preferenza discendente, per determinare le migliori prestazioni della rete. L'indicatore corrispondente sarà dato dalla lunghezza media dei percorsi minimi veicolari che collegano i nodi periferici di confine con l'attrattore scelto come riferimento.

Prestazioni di accessibilità - tempo percorrenza itinerari veicolari

- $\ell_{i,k}$, lunghezza dell'arco i appartenente al minimo percorso che collega il centroide k all'attrattore di riferimento scelto, interno alla porzione di rete;
- $v_{i,k}$, velocità media, durante l'ora di punta, del flusso f_a sull'arco i , appartenente al minimo percorso che collega il centroide k all'attrattore di riferimento scelto;
- $\delta_{j,k}$, tempo di ritardo media nell'intersezione j appartenente al minimo percorso che collega il centroide k all'attrattore di riferimento scelto;
- n , numero percorsi minimi tra i centroidi k e l'attrattore di riferimento scelto.

$$c_2 = (\sum_{i,k}(\ell_{i,k} / v_{i,k}) + \sum_{j,k}(\delta_{j,k})) / \sum_k(n_k) \quad (4.2.2)$$

3. Area di meta: utenti del trasporto privato, ambito operativo: sicurezza

Le prestazioni in questo ambito vengono valutate in funzione del numero complessivo di punti di conflitto tra le traiettorie delle correnti veicolari che attraversano le intersezioni. La diminuzione dei conflitti veicolari e quindi la direzione discendente del valore dell'indicatore, contribuisce a realizzare migliori condizioni di sicurezza e di performance generali. L'indicatore corrispondente è dato dalla somma dei punti di conflitto nelle intersezioni presenti nell'area in esame.

Prestazioni di sicurezza - punti di conflitto veicolo-veicolo nelle intersezioni

- pc_j , numero punti di conflitto (di: intersezione, confluenza e diversione) tra le correnti veicolari che si immettono nell'intersezione j ;

$$c_3 = \sum_j pc_j \quad (4.2.3)$$

4. Area di meta: utenti del trasporto pubblico, ambito operativo: deflusso

Le prestazioni vengono misurate in funzione della frequenza e della permeabilità del servizio di trasporto pubblico all'interno della rete. La direzione di preferenza dovrà essere quella determinare valori alti dell'indicatore, in considerazione del fatto che le prestazioni sono incrementate da una maggiore presenza di km percorsi dalle linee di trasporto pubblico. L'indicatore corrispondente è dato dal numero di km di rete di trasporto pubblico all'interno della porzione di rete moltiplicati per il numero di mezzi che vi circolano in un'ora.

Prestazioni di deflusso – km rete serviti

- bus_i , numero bus in attraversamento nell'arco i appartenente alla porzione di rete;
- ℓ_i , lunghezza dell'arco i ;

$$c_4 = \sum_i(\ell_i \cdot bus_i) \quad (4.2.4)$$

5. Area di meta: utenti del trasporto pubblico, ambito operativo: accessibilità

Le prestazioni vengono misurate in funzione della possibilità che hanno i residenti di raggiungere agevolmente dalla propria abitazione il sistema di trasporto pubblico. Maggiori prestazioni in tal senso sono rappresentata dall'aumento della popolazione servita, questo indicatore dovrà avere pertanto una direzione di preferenza ascendente. L'indicatore corrispondente è dato dal numero di residenti presenti a meno di 300 metri dalle fermate del servizio di trasporto pubblico.

Prestazioni di accessibilità – popolazione residente entro un raggio di 300 m dalle fermate

- $resi$, numero di residenti entro un raggio di 300 m dalla fermata i ;

$$c_5 = \sum_i(res_i) \quad (4.2.5)$$

6. Area di meta: utenti del trasporto pubblico, ambito operativo: sicurezza

Le prestazioni vengono misurate in relazione alle fermate del servizio di trasporto pubblico che presentano elementi a tutela degli utenti e a miglioramento del loro comfort. La mancanza di pensiline crea disagi agli utenti in attesa del mezzo pubblico, particolarmente in caso di avverse condizioni atmosferiche. L'indicatore corrispondente è dato dal numero di fermate di servizio di trasporto pubblico dotate di pensiline. Una maggiore presenza di fermate con pensiline, determina un corrispondente aumento delle prestazioni della rete in questo ambito.

Prestazioni di sicurezza – numero fermate con pensilina

- fer , fermata dotata di pensilina nell'arco i , appartenente alla porzione di rete;

$$c_6 = \sum_i(fer_i) \quad (4.2.6)$$

7. Area di meta: utenti deboli della strada, ambito operativo: deflusso

Le prestazioni sono rappresentate in funzione del livello di emissioni inquinanti che si registra nella porzione di rete. L'aumento delle prestazioni si verificherà in corrispondenza di una diminuzione del livello di emissioni inquinanti, la direzione di preferenza dovrà quindi essere discendente.

Prestazioni di deflusso - livello delle emissioni inquinanti

- ξ_j , peso dei fattori inquinanti;

- $po_{j,a}^k$, fattori inquinanti emessi durante la fascia oraria k in funzione del flusso d'arco;
- f_a^k , flusso sull'arco a durante la fascia oraria k;

$$c_7 = \sum_a (\sum_j \xi_j \cdot po_{j,a}^k (f_a^k)) \quad (4.2.7)$$

8. Area di meta: utenti deboli della strada, ambito operativo: accessibilità

Le prestazioni vengono misurate in funzione della distanza pedonale tra l'attrattore di riferimento interno alla rete ed i nodi periferici di confine con la restante rete urbana. Minore sarà questa distanza, maggiori saranno le prestazioni della rete in questo ambito. L'indicatore corrispondente è dato dalla distanza media dei percorsi pedonali tra ciascun nodo periferico della porzione di rete e l'attrattore interno preso come riferimento (la stazione ferroviaria).

Performance di accessibilità - tempo di percorrenza itinerari pedonali

- $\ell_{i,k}$, lunghezza dell'arco i appartenente al minimo percorso che collega il centroide k all'attrattore di riferimento scelto interno alla porzione di rete;
- n_k , numero minimi percorsi tra i centroidi k e l'attrattore di riferimento scelto.

$$c_8 = \sum_{i,k} (\ell_{i,k}) / \sum_k (n_k) \quad (4.2.8)$$

9. Area di meta: utenti deboli della strada, ambito operativo: sicurezza

Le prestazioni vengono misurate sulla base del numero di attraversamenti pedonali presenti nell'intorno delle intersezioni stradali, dove si verificano punti di conflitto tra correnti pedonali e correnti veicolari. L'aumento delle prestazioni in questo ambito si realizza diminuendo la presenza di attraversamenti stradali dove le correnti non sono completamente separate; questo parametro avrà una direzione di preferenza discendente. Il relativo indicatore sarà dato dal numero di attraversamenti pedonali presenti a meno di 75 m dalle intersezioni stradali, dove si verificano conflitti tra correnti veicolari e correnti pedonali.

Performance di sicurezza - punti di conflitto veicolo-pedone nelle intersezioni

- $ap_{i,j}$ attraversamento pedonale i a meno di 75 m dall'intersezione j;

$$c_9 = \sum_{i,j} (ap_{i,j}) \quad (4.2.9)$$

10. Area di meta: gestori, ambito operativo: deflusso

Le prestazioni sono misurate in funzione del grado di congestione sulla rete, definite dal grado di saturazione ossia dal rapporto tra l'entità del flusso veicolare che percorre un arco e la capacità dell'arco stesso. La diminuzione del livello di congestione corrisponde ad un un livello di prestazioni più elevato. L'indicatore corrispondente è dato dal della media pesata sulla lunghezza dei rami, del grado di saturazione della rete.

Performance di deflusso – grado di saturazione della rete

- ℓ_i , lunghezza dell'arco i ;
- f_a , flusso sull'arco i ;
- c , capacità dell'arco i ;
- $(v/c)_i$, rapporto v/c sul ramo i , durante l'ora di punta;

$$c_{10} = \sum_i ((f_a/c)_i \cdot \ell_i) / \sum_i (\ell_i) \quad (4.2.10)$$

11. Area di meta: gestori, ambito operativo: accessibilità

Le prestazioni sono misurate attraverso il livello di connettività tra i rami della rete; queste saranno maggiori quanto più alto sarà il numero di collegamenti viari tra i nodi della rete.

Performance di accessibilità – grado di connettività della rete

- n_i , nodo all'interno della porzione di rete;
- n_j , nodo con almeno un collegamento con il nodo i ;
- ℓ_{ij} , con $i \neq j$, pari a 1 se il nodo i è collegato con il nodo j , altrimenti pari a 0;
- ℓ_{ji} , con $i \neq j$, pari a 1 se il nodo j è collegato con il nodo i , altrimenti pari a 0;

$$c_{11} = (\sum_{ij} \ell_{ij} + \sum_{ji} \ell_{ji}) / (n_j \cdot (n_j - 1)) / \sum_i n_i \quad (4.2.11)$$

12. Area di meta: gestori, ambito operativo: sicurezza

Il livello di prestazioni viene misurato in funzione del numero di manovre critiche che si verificano nelle intersezioni. In un'intersezione le manovre che presentano maggiori criticità dal punto di vista della sicurezza sono quelle di svolta a sinistra, lungo le cui traiettorie si registrano

punti di conflitto con altre correnti veicolari. La funzione avrà dunque una direzione di preferenza discendente per migliorare le prestazioni in questo ambito.

L'indicatore corrispondente è dato dal rapporto tra il numero di manovre di svolta a sinistra che nelle intersezioni generano punti di conflitto con correnti veicolari opposte, ssx , e la sommatoria delle lunghezze ℓ_i dei rami i appartenenti alla porzione di rete stradale urbana.

Performance di sicurezza – diminuzione numero di interazioni critiche nelle intersezioni

- ssx_j , numero di svolte a sinistra nell'intersezione j che generano punti di conflitto tra correnti veicolari;

$$C_{12} = \sum_j SSX_j \quad (4.2.11)$$

Nella tabella seguente è riepilogato il set di indicatori scelti:

Tabella 3 - Tabella degli indicatori scelti per l'analisi multicriteria di una porzione di rete

		AREE DI META			
		UTENTI			GESTORI
		TRASPORTO PRIVATO	TRASPORTO PUBBLICO	DEBOLI	
AMBITI OPERATIVI	CIRCOLAZIONE	$\sum_i (\ell_i / v_i) + \sum_j (\delta_j)$	$\sum_i (\ell_i \cdot bus_i)$	$\sum_a (\sum_j \xi_j \cdot \rho o_{j,a}^{k_a} (f_a^k))$	$\sum_i ((f_a/c)_i \cdot \ell_i) / \sum_i (\ell_i)$
	ACCESSIBILITÀ	$(\sum_{i,k} (\ell_{i,k} / v_{i,k}) + \sum_{j,k} (\delta_{j,k})) / \sum_k (n_k)$	$\sum_i (res_i)$	$\sum_{i,k} (\ell_{i,k}) / \sum_n (n_k)$	$(\sum_{ij} \ell_{ij} + \sum_{ji} \ell_{ji}) / (n_j \cdot (n_j - 1)) / \sum_i n_i$
	SICUREZZA	$\sum_j \rho c_j$	$\sum_i (fer_i)$	$\sum_{i,j} (ap_{ij})$	$\sum_j SSX_j$

4.2.4 Applicazione

L'applicazione del modello multi-criteria ha interessato una porzione della rete stradale urbana della città di Benevento, in particolare l'area denominata "Rione Ferrovia", localizzata nel versante nord della città. Questa porzione di rete stradale urbana risulta particolarmente significativa dal punto di vista della pianificazione stradale, dal momento che è caratterizzata dalla presenza della stazione ferroviaria centrale, che rappresenta sia un forte attrattore di traffico che un fondamentale nodo di scambio modale all'interno dell'intera rete urbana di trasporto. La rete viaria all'interno del quartiere ha una lunghezza di circa 3,5 km e conta complessivamente 14 arterie e 18 intersezioni. I rami stradali sono per la maggior parte di tipo locale, in quanto soddisfano una domanda di spostamento che si distribuisce nella rete interna al quartiere stesso; alcuni rami invece rappresentano assi stradali di tipo gerarchico superiore, in quanto consentono gli attraversamenti tra i quartieri adiacenti e quello oggetto dello studio. Le intersezioni stradali sono regolate tutte mediante segnaletica di "stop" e "precedenza"; allo stato del lavoro non erano presenti intersezioni regolate mediante impianto semaforico.

Gli scenari analizzati per il confronto sono descritti nel seguente elenco. L'applicazione del modello di scelta è finalizzata a determinare quale, tra le seguenti quattro alternative possibili, viene identificata come dominante sulle altre e capace di rispondere meglio alle esigenze delle aree di meta. Oltre allo stato attuale, gli altri scenari proposti per il confronto sono denominati: pre-intervento, tecnologico e sostenibile. Negli scenari di confronto sono stati ipotizzati interventi che hanno determinato delle modifiche sulla viabilità e di conseguenza sul corrispondente valore degli indicatori.

- lo stato attuale rappresenta la rete attuale, modificata secondo le disposizioni sulla viabilità proposte dal vigente Piano Urbano del Traffico;
- lo scenario di pre-intervento rappresenta invece la rete prima dell'applicazione delle modifiche introdotte dal PUT: in questo scenario sono state ipotizzate condizioni peggiorative nei confronti delle aree di meta precedentemente individuate. La rete sarà pertanto caratterizzata da tempi di percorrenza più elevati, da una minore permeabilità del servizio di trasporto pubblico, da un più elevato livello di emissioni inquinanti, ecc.;
- lo scenario tecnologico è stato invece definito proponendo condizioni migliorative per la mobilità relativa al servizio di trasporto privato e a quello pubblico. In questo caso gli

effetti della realizzazione di questo scenario si rifletteranno nella diminuzione del grado di congestione sulla rete, nella diminuzione dei punti di conflitto tra correnti veicolari, nella maggiore permeabilità del servizio di trasporto pubblico, ecc.;

- lo scenario sostenibile è stato proposto con l'obiettivo di rappresentare uno scenario progettuale che comprendesse interventi finalizzati a migliorare le condizioni degli utenti del servizio di trasporto pubblico e degli utenti deboli della strada. Tale scenario è caratterizzato, rispetto allo stato attuale, dalla maggiore permeabilità del servizio di trasporto pubblico, dalla diminuzione del livello di emissioni inquinanti, dalla diminuzione dei conflitti tra correnti veicolari e pedonali.

Nella tabella seguente sono rappresentati i valori degli indicatori, determinati per ciascuno scenario di confronto:

Tabella 4 - Valori indicatori negli scenari analizzati

Funzione obiettivo	Scenario Stato Attuale	Scenario Pre Intervento	Scenario Tecnologico	Scenario Sostenibile
tempo percorrenza rete [s]	1'200	1'368	1'128	1'236
tempo percorrenza itinerari veicolari [s]	90	99	85	93
punti di conflitto veicolo – veicolo	113	124	108	113
km rete serviti	30	26	32	35
popolazione residente raggio 300 m	2'011	2'011	1'890	2'313
numero fermate con pensilina	1	1	2	4
livello di emissioni inquinanti	21	23	21	18
tempo percorrenza itinerari pedonali [s]	310	310	310	248
conflitti veicolo – pedone	25	25	25	19
grado di saturazione	0,75	0,81	0,71	0,80
grado di connettività	0,139	0,131	0,146	0,139
numero manovre svolta sinistra	22	24	21	21

4.2.5 Risultati e Conclusioni

L'applicazione del modello di scelta ha consentito di individuare quale scenario alternativo risponde meglio alle esigenze delle differenti aree di meta, in funzione del peso che viene assegnato ai diversi criteri e del valore assunto da questi in corrispondenza di ciascuno scenario. Una prima analisi viene effettuata assegnando a tutte le aree di meta peso uguale, in tal modo non viene individuata un'area di meta prioritaria rispetto alle altre, ma tutte acquisiscono la stessa importanza. Questa situazione è rappresentata dal set di pesi "I".

Per verificare in che modo la scelta dell'alternativa di miglior compromesso è sensibile al set di pesatura utilizzato, le analisi successive sono state effettuate variando il peso assegnato alle aree di meta, enfatizzando di volta in volta, quello assegnato a ciascuna area di meta.

Sono stati definiti 5 set differenti di pesatura, riportati nel seguente elenco:

- Set di pesatura "I", ogni area di meta ha peso uguale alle altre e pari al 25% del peso complessivamente assegnato;
- Set di pesatura "II", l'area di meta trasporto privato assume un peso pari al doppio del peso assegnato alle altre aree di meta;
- Set di pesatura "III", l'area di meta trasporto pubblico assume un peso pari al doppio del peso assegnato alle altre aree di meta;
- Set di pesatura "IV", l'area di meta utenti deboli assume un peso pari al doppio del peso assegnato alle altre aree di meta;
- Set di pesatura "V", l'area di meta gestori assume un peso pari al doppio del peso assegnato alle altre aree di meta;

La sintesi dei pesi assegnati alle differenti aree di meta e valore degli indici di dominanza della concordanza e di dominanza della discordanza per ciascuna alternativa sono rappresentate nella seguente tabella, dove le aree di meta sono denominate: a per l'"area di meta trasporto privato", b per l'"area di meta trasporto pubblico", c per l'"area di meta utenti deboli", d per l'area di meta "gestori".

Tabella 5 - Valori degli indici di dominanza della concordanza e di dominanza della discordanza

SET PESI	AREE DI META				CONFRONTO SCENARI							
					Stato Attuale		Pre Intervento		Tecnologico		Sostenibile	
	a	b	c	d	I_{c_i}	I_{d_i}	I_{c_i}	I_{d_i}	I_{c_i}	I_{d_i}	I_{c_i}	I_{d_i}
I	25%	25%	25%	25%	-0,167	-0,715	-2,333	0,838	1,167	-0,173	1,333	0,050
II	40%	20%	20%	20%	0	-0,721	-2,467	0,721	1,533	-0,184	0,933	0,184
III	20%	40%	20%	20%	-0,333	-0,632	-2,200	0,478	0,867	-0,104	1,667	0,257
IV	20%	20%	40%	20%	-0,200	-0,679	-2,200	0,894	0,733	0,098	1,667	-0,313
V	20%	20%	20%	40%	-0,133	-0,590	-2,247	1,001	1,533	-0,179	1,067	-0,232

Dalla tabella si evince che, nel caso in cui alle aree di meta venga assegnato peso uguale (set di pesatura "I"), lo scenario individuato come preferibile, cioè come quello che mediamente soddisfa tutte le funzioni obiettivo, risulta quello tecnologico, cioè l'unico per il quale l'indice I_c assume un valore non negativo e l'indice I_d assume un valore non positivo, rispettivamente pari a 1,167 e -0,173. Nello svolgimento dell'analisi di sensitività è stato variato a turno il peso di ciascuna area di meta, attribuendo a ciascuna area, un peso pari al doppio di quello assegnato alle altre, ed è stata verificata la corrispondente variazione degli indici di dominanza della concordanza e di dominanza della discordanza. Si riscontra che la scelta dell'alternativa preferibile risulta univoca, sempre relativa allo scenario tecnologico, in corrispondenza dei set di pesatura "II" e "III", nei quali l'area di meta con il peso prevalente risulta rispettivamente quella degli utenti del servizio di trasporto privato e quella degli utenti del servizio di trasporto pubblico. Nel set di pesatura "IV" si attribuisce il peso prevalente all'area di meta degli utenti deboli della strada e lo scenario individuato come mediamente preferibile è quello denominato sostenibile, dove gli indici di dominanza della concordanza e di dominanza della discordanza risultano rispettivamente pari a 1,667 e -0,313.

Nell'ultimo set di pesatura, sia per lo scenario tecnologico che quello sostenibile vengono determinati indici di dominanza della concordanza positivi e indici di dominanza della discordanza negativi. L'indice di dominanza della concordanza più elevato viene ricavato per lo scenario tecnologico, mentre l'indice di dominanza della discordanza inferiore è ricavato per lo scenario sostenibile. Questa situazione indica che entrambi gli scenari rappresentano soluzioni di buon compromesso senza che sia riconoscibile una soluzione univoca che identifica uno scenario capace di soddisfare meglio di tutti gli altri le funzioni obiettivo.

4.3 UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI BASATO SULL'ANALISI CONCORDANTE PER LE ANALISI SULLA SICUREZZA STRADALE

Basato sul lavoro presentato in (Fancello, Carta, & Fadda, 2015)

4.3.1 Introduzione

Il caso studio presentato in questo paragrafo riguarda uno dei più importanti aspetti relativi alla gestione delle reti pubbliche di trasporto, cioè quello della programmazione degli interventi infrastrutturali finalizzati ad adeguare le condizioni di sicurezza della rete, per riportarle a standard adeguati. Questo caso studio riguarda in particolare una problematica di gerarchizzazione, finalizzata ad individuare su quali tronchi omogenei di una arteria stradale occorre programmare interventi prioritari infrastrutturali per il ripristino delle condizioni di sicurezza. Questo campo di lavoro abbraccia due aspetti principali, quello relativo alle condizioni che caratterizzano la sicurezza della rete stradale e quello relativo alla disponibilità delle risorse finanziarie disponibili, che spesso non sono sufficienti a coprire tutti gli interventi necessari.

Nell'attività di gestione delle reti di trasporto infatti accade frequentemente che le risorse economiche risultino insufficienti per mantenere la rete stradale in buone condizioni dal punto di vista della funzionalità, dello stato della pavimentazione, della segnaletica, dell'illuminazione, degli standard di sicurezza. Quando si pianificano interventi di sicurezza sulle reti stradali, le autorità di gestione delle strade si trovano di fronte alla necessità di programmare gli interventi sulla base dei fondi disponibili.

Per compiere una scelta in modo oggettivo, utilizzando un sistema capace di considerare i molteplici aspetti che entrano in gioco, è stata proposta una metodologia in grado di supportare l'attività decisionale compiuta dall'autorità di gestione di un sistema stradale, finalizzata ad identificare su quali tronchi stradali programmare e realizzare interventi prioritari di sicurezza. Questa metodologia parte dall'esame dei criteri di scelta che attraverso i quali poter misurare le condizioni di sicurezza dei tronchi stradali, per giungere a definire una priorità di intervento degli elementi della rete.

Nella letteratura scientifica sono presenti numerosi lavori che si focalizzano sul tema della pianificazione degli interventi su una rete stradale e che si pongono la finalità di valutare le

condizioni di sicurezza, ma non viene presentata una metodologia unica e condivisa che fornisca supporto all'amministratore di una rete quando è necessario ottimizzare le risorse disponibili per l'esecuzione di lavori finalizzati a garantire adeguate condizioni di sicurezza. Saaty in (Saaty, 1995) presenta cinque casi applicativi del metodo Analytic Hierarchy Process per illustrare differenti utilizzi di questo metodo analisi a criteri multipli nel settore dei trasporti; Dell'Acqua in (Dell'Acqua, De Luca, & Mauro, 2011) presenta un modello di classificazione dei nodi critici di una rete stradale, utilizzando un modello di supporto alle decisioni basato su tecniche di cluster analysis, utilizzando un insieme di indicatori relativi alle condizioni geometriche, di illuminazione e di condizioni della pavimentazione. Coll in (Coll, Moutari, & Marshall, 2013) presenta un contributo alla ricerca per stimare le condizioni di sicurezza stradale di elementi della rete attraverso la definizione di un insieme opportuno di indicatori e la specificazione di una metodologia per la loro aggregazione in un indicatore sintetico di sicurezza.

Questo caso applicativo presenta una metodologia funzionale alla gerarchizzazione di un insieme di differenti alternative, comparandone le prestazioni che raggiungono in corrispondenza di differenti funzioni obiettivo. È stata adottata una metodologia di analisi a criteri multipli, derivata dall'Analisi Concordante (Giuliano, 1985), utilizzata per risolvere i problemi di scelta ed utilizzata nel presente caso applicativo per risolvere una problematica di gerarchizzazione attraverso una modifica all'algoritmo di calcolo, così come specificato nel paragrafo 3.3.

4.3.2 Metodologia

La metodologia di analisi multi-criteria adottata per la valutazione di questo caso studio è quella dell'Analisi Concordante modificata con passaggio iterativo, così come descritta nel paragrafo 3.3. Questa metodologia permette di risolvere problematiche di gerarchizzazione costruendo un elenco gerarchico delle alternative considerate nell'insieme decisionale. La metodologia è derivata dall'analisi concordante ed estende la funzionalità di quel metodo relativo invece alla risoluzione di problematiche di scelta.

4.3.3 Selezione dei criteri

A base del modello di analisi multi-criteria è stato definito un insieme di criteri capaci di rappresentare le condizioni di sicurezza dei tronchi stradali omogenei e sulla base dei quali definire un ordine di priorità degli interventi. Sono stati ripresi alcuni criteri proposti nel lavoro

presentato in (Fancello, Carta, & Fadda, 2014). La scelta dei criteri è basata sul principio che gli indicatori devono essere rappresentativi delle condizioni di sicurezza e devono essere di facile calcolo o determinazione per il soggetto decisionale. Devono cioè essere dati già a disposizione dell'Amministrazione o di facile determinazione. I criteri sono stati raggruppati nelle seguenti aree di meta: mobilità, geometria, incidentalità

- Mobilità, considera aspetti legati ai flussi veicolari, distribuzione delle correnti di traffico e tipologia del traffico transitante. Questa area di meta raggruppa le funzioni obiettivo c_1, c_2, c_3, c_4 :

c_1 , fattore dell'ora di punta (PHF), rapporto tra il volume orario di traffico registrato durante l'ora di punta e la massima portata registrata nell'intervallo elementare di 15 minuti ragguagliata all'ora; utilizzato come misura della variazione della domanda all'interno dell'ora di punta (Transportation Research Board, 2010);

c_2 , %hv, % di veicoli pesanti all'interno della corrente di traffico (Transportation Research Board, 2010);

c_3 , ADT, Traffico Giornaliero Medio (Average Daily Traffic), misurato in veicoli per giorno;

c_4 , grado di saturazione, rapporto tra volume e capacità (v/c) (Transportation Research Board, 2010);

- Geometria, considera aspetti legati alle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura stradale. Questa area di meta comprende la funzione obiettivo c_5 .

c_5 , fattore correttivo per larghezza della corsia (f_w), Il fattore correttivo per larghezza della corsia considera l'impatto di una sezione minore delle condizioni standard pari a 3.6 m, sul flusso di saturazione (Transportation Research Board, 2010);

- Incidentalità, considera il numero di incidenti in termini assoluti e relativi, così come le loro conseguenze sociali. Questa area di meta comprende le seguenti funzioni obiettivo: $g_6, g_7, g_8, g_9, g_{10}$:

c_6 , potenziale di sicurezza (SAPO), definite come la somma del costo sociale degli incidenti per lunghezza chilometrica del tratto stradale omogeneo considerato, rappresenta una misura di densità di costo (European Commission, 2003);

c_7 , numero annuale di incidenti, registrati nel tronco stradale omogeneo considerato;

c_8 , numero annuale di persone che hanno subito danni fisici, registrati nel tronco stradale omogeneo considerate;

c_9 , numero di incidenti dove si sono verificati danni solo alle cose;

c_{10} , tasso di incidenti (Tif), rapporto tra il numero di incidenti e il flusso veicolare moltiplicato per la lunghezza chilometrica del tratto stradale omogeneo considerato (Elvik, Høy, Vaa, & Sørensen, 2009);

I valori dei criteri c_1 , c_2 e c_3 , sono stati ricavati attraverso conteggi di traffico misurati da rilevatori e attraverso software di simulazione di traffico. I valori per il criterio c_4 sono stati ottenuti attraverso misure dirette. I valori dei criteri g_5 e g_6 , sono stati determinati dall'analisi dei dati storici degli incidenti nel periodo di tempo tra il 2007 e il 2011.

4.3.4 Applicazione

La metodologia di analisi multi-criteria definita nel paragrafo 3.3 è stata applicata al caso studio in esame, finalizzato a ordinare gerarchicamente un insieme di tronchi omogenei di un'arteria stradale in ambito extraurbano, sulla base dell'insieme di criteri di sicurezza definiti nel paragrafo 4.3.3. L'arteria stradale corre dal versante meridionale a quello settentrionale della Sardegna, la seconda isola maggiore in Italia, e assume la denominazione nazionale SS. 131 e denominazione secondo la rete stradale internazionale europea E25. Il soggetto decisionale ha richiesto lo svolgimento dell'analisi multi-criteria su un tronco specifico di questa arteria, che è stato suddiviso negli 11 tronchi stradali omogenei che hanno costituito l'insieme decisionale sul quale applicare la metodologia multi-criteria di gerarchizzazione.

La matrice decisionale è rappresentata nella tabella seguente, dove le righe rappresentano le alternative dell'insieme decisionale, le colonne rappresentano i criteri di valutazione, i singoli elementi della matrice rappresentano le prestazioni che ciascuna alternativa raggiunge in corrispondenza di ciascun criterio.

Tabella 6 - Matrice decisionale

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₂
C ₁	0,89	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,93	0,94
C ₂	0,20	0,13	0,10	0,09	0,17	0,18	0,16	0,14	0,12	0,12	0,14
C ₃	12'871	8'752	9'157	10'356	7'088	7'081	7'987	10'719	14'142	15'719	20'337
C ₄	19,50	13,50	13,00	14,50	13,50	14,00	15,50	16,50	19,00	19,50	27,50
C ₅	0,81	0,83	0,82	0,81	0,80	0,81	0,82	0,82	0,83	0,80	0,79
C ₆	194,21	84,44	59,11	545,67	503,45	126,66	1'164,15	1'006,90	393,68	1'277,10	2'062,37
C ₇	0	0	0	1	1	0	3	2	1	2	2
C ₈	23	10	7	29	24	15	31	48	11	80	173
C ₉	13	6	5	20	17	10	17	34	8	52	94
C ₁₀	0,09	0,08	0,04	0,15	0,19	0,10	0,11	0,08	0,08	0,36	0,36

Per lo svolgimento dell'analisi multi-criteria, le preferenze del soggetto decisionale sono state tradotte nei set di pesatura rappresentati nella tabella sotto indicata. Per condurre un'analisi di sensitività e valutare in che modo la variazione dell'attribuzione di un sistema diverso di importanza relativa modifica la scelta finale, sono stati utilizzati quattro set differenti di pesatura. Nel primo "I", secondo le preferenze del soggetto decisionale, viene attribuito lo stesso peso a tutte le aree di meta: Mobilità, Geometria e Incidentalità. Ciascuna delle tre aree di meta riceve un peso pari ad un terzo del peso unitario complessivamente assegnato a tutte le aree di meta. In questo caso si rappresenta la condizione che il soggetto decisionale non esprima alcuna preferenza tra le aree di meta che assumono la stessa importanza. Negli altri set di pesatura, "II", "III" e "IV", viene condotta un'analisi di sensitività per determinare in che modo la variazione del peso assegnato ai criteri modifica la gerarchia di miglior compromesso. Ciascuna area di meta alternativamente, acquisisce il doppio del peso assegnato alle altre. Rispetto alla situazione di equità tra le aree di meta rappresentata dal set di pesatura "I", nei set di pesatura "II", "III" e "IV", viene enfatizzato il ruolo di ciascuna area di meta alternativamente.

In tutti i quattro set di pesatura utilizzati nell'analisi, il peso assegnato a ciascuna area di meta viene ripartito in modo uguale tra i criteri appartenenti all'area di meta. In tal modo si diminuisce il numero di parametri ai quali il soggetto decisionale deve assegnare priorità di preferenza. Cioè a fronte di una semplificazione data dall'assegnazione dello stesso peso a tutti i criteri appartenenti alla stessa area di meta, si ha una maggiore garanzia di attribuzione della corretta

importanza dei criteri da parte del soggetto decisionale, che potrebbe essere portato a una valutazione non conforme, in presenza di un numero eccessivo di parametri.

I quattro set di pesatura sono elencati nella tabella seguente:

- Set pesatura: "I": 1/3 mobilità, 1/3 geometria, 1/3 incidentalità;
- Set pesatura: "II": 1/2 mobilità, 1/4 geometria, 1/4 incidentalità;
- Set pesatura: "III": 1/4 mobilità, 1/2 geometria, 1/4 incidentalità;
- Set pesatura: "IV": 1/4 mobilità, 1/4 geometria, 1/2 incidentalità;

Tabella 7 - Set di pesatura

	I	II	III	IV
c ₁	0,0833	0,1250	0,0625	0,0625
c ₂	0,0833	0,1250	0,0625	0,0625
c ₃	0,0833	0,1250	0,0625	0,0625
c ₄	0,0833	0,1250	0,0625	0,0625
c ₅	0,3333	0,2500	0,0500	0,2500
c ₆	0,0667	0,0500	0,0500	0,1000
c ₇	0,0667	0,0500	0,0500	0,1000
c ₈	0,0667	0,0500	0,0500	0,1000
c ₉	0,0667	0,0500	0,0500	0,1000
c ₁₀	0,0667	0,0500	0,0500	0,1000

Utilizzando i set di pesatura mostrati nella tabella sopra è stata condotta un'analisi di sensitività per valutare la stabilità della soluzione nei confronti del set di pesatura adottato.

4.3.5 Risultati

I risultati delle analisi sono mostrate nelle tabelle sotto indicate, dove viene rappresentato il valore degli indici di dominanza della concordanza (Ic_i) e di dominanza della discordanza (Id_i) per ciascuna alternativa a_i e per ciascuno dei quattro set di pesatura analizzati.

I valori degli indici ottenuti durante la prima iterazione mostrano che gli unici tronchi omogenei per i quali si ottiene un indice di dominanza della concordanza positivo ed un indice di

dominanza della discordanza negativo sono quelli denominati: a_1 , per i set di pesatura "I", "II" e "III"; a_8 , per i set di pesatura "I", "II" e "IV"; a_{12} per i set di pesatura "I"; "II"; "III" e "IV". La scelta finale cade sul tronco omogeneo " a_{12} " in quanto si ottengono i valori maggiori per l'indice I_c e i valori minori di I_d , per tutti i sistemi di pesi adottati, rispetto a quanto ottenuto per le altre alternative. Questo tronco stradale omogeneo risulta quello a cui viene assegnata la priorità maggiore di intervento nella scala gerarchica. I valori degli indici di ciascuna alternativa che ottiene un indice I_c positivo e I_d negativo sono rappresentata nella tabella sotto.

Tabella 8 - Iterazione 1.

Seti di pesatura	a_1		a_8		a_{12}	
	I_{c1}	I_{c1}	I_{c1}	I_{c8}	I_{c1}	I_{c12}
I	0,45	-0,663	0,7	-0,634	8,767	-1,378
II	1,025	-0,232	1,15	-0,671	8,45	-0,564
III	0,838	-0,784			9,075	-1,565
IV			1,425	-0,54	8,775	-0,535

La seconda iterazione, eseguita sui rimanenti 10 tronchi stradali omogenei, cioè sull'insieme decisionale iniziare dal quale viene estratta l'alternativa risultata di miglior compromesso nella iterazione precedente, indica come prima scelta il tronco stradale a_8 . Al contrario di quanto si registra per la prima iterazione la scelta fornita dal modello fornisce informazioni contrastanti. Per esempio nel set di pesatura "III" la scelta ricade nel tronco stradale a_1 . Per questa ragione è stata avviata un'analisi di sensitività maggiormente estesa, introducendo ulteriori sistemi di pesatura delle funzioni obiettivo, che hanno enfatizzato il peso attribuito in misura ancora maggiore, assegnando a ciascuna area di meta alla volta, una misura pari a tre e quattro volte il peso attribuito alle altre due.

I set di pesatura sono elencati nella tabella seguente:

- Set pesatura: "V": 0,6 mobilità, 0,2 geometria, 0,2 incidentalità;
- Set pesatura: "VI": 0,2 mobilità, 0,6 geometria, 0,2 incidentalità;
- Set pesatura: "VII": 0,2 mobilità, 0,2 geometria, 0,6 incidentalità;

- Set pesatura: "VIII": 0,8 mobilità, 0,2 geometria, 0,2 incidentalità;
- Set pesatura: "IX": 0,8 mobilità, 0,2 geometria, 0,2 incidentalità;
- Set pesatura: "X": 0,8 mobilità, 0,2 geometria, 0,2 incidentalità;

Si registra la tendenza alla scelta diretta verso il tronco stradale a_8 . Anche qui la scelta non è univoca per tutti gli insiemi di pesatura adottati. L'insieme delle soluzioni individuate di come di miglior compromesso, per ogni schema di pesatura adottato, sono presentate nelle seguenti tabelle.

Tabella 9 - Iterazione 2, set di pesatura I,II,III, IV.

Seti di pesatura	a_1		a_4		a_6		a_8	
	lc_1	ld_1	lc_4	ld_4	lc_6	ld_6	lc_8	ld_8
I	1,283	-0,027	0,967	-0,062			1,467	-1,226
II							1,850	-1,193
III	1,713	-0,153	1,475	-0,379	0,450	-0,262	0,350	-0,800
IV	0,363	-0,436	1,575	-0,120			2,200	-1,064

Tabella 10 - Iterazione 2, set di pesatura V, VI, VII

Seti di pesatura	a_1		a_4		a_6		a_8		a_9	
	lc_1	ld_1	lc_4	ld_4	lc_6	ld_6	lc_8	ld_8	lc_9	ld_9
V							2,08	-1,277	0,2	-0,03
VI	1,97	-0,278	1,78	-0,461	0,96	-0,247				
VII			1,94	-0,079			2,64	-0,958		

Tabella 11 - Iterazione 2, set di pesatura VIII, IX, X

Seti di pesatura	a ₁		a ₈		a ₉	
	lc ₁	ld ₁	lc ₈	ld ₈	lc ₉	ld ₉
VIII			2,54	-0,589	2,1	-0,35
IX	2,485	-0,03				
X			3,52	-0,859		

La terza iterazione svolta sui rimanenti 9 tronchi stradali omogenei, identifica il tronco denominato "a₁" come la scelta di miglior compromesso. In modo analogo a quando è avvenuto nella precedente iterazione, l'applicazione dell'analisi non fornisce un risultato chiaro utilizzando i primi 4 set di pesatura. Anche in questo caso è stato necessario introdurre set di pesi aggiuntivi usati nella precedente iterazione. I risultati complessivi risultano meno definiti rispetto alla seconda iterazione. Nella prima serie di pesi, "I" l'alternativa a₁ risulta la scelta di miglior compromesso per tre set di pesatura rispetto ai quattro analizzati; lo stesso vale quando viene applicato il secondo gruppo di set di pesatura V, VI e VII e il terzo ("VIII", "IX" e "X"), dove l'alternativa a₁ viene scelta una volta per ciascun gruppo di pesi. Questa iterazione ha identificato i tronchi a₄, a₆ e a₉ come soluzioni accettabili, anche se questa scelta non ha riguardato l'intero complesso degli insiemi di pesatura adottati.

Tabella 12 - Iterazione 3, set di pesi I, II, III, IV

Seti di pesatura	a ₁		a ₄		a ₆	
	lc ₁	ld ₁	lc ₄	ld ₄	lc ₆	ld ₆
I	0,983	-0,184				
II						
III	1,238	-0,275	1,375	-0,146	0,225	-0,223
IV	0,288	-0,572	1,875	-0,042		

Tabella 13 - Iterazione 3, set di pesatura V, VI, VII

Seti di pesatura	a ₁		a ₄		a ₆		a ₉	
	lc ₁	ld ₁	lc ₄	ld ₄	lc ₆	ld ₆	lc ₉	ld ₉
V							0,3	-0,14
VI	1,39	-0,365	1,5	-0,067	0,58	-0,108		
VII								

Tabella 14 - Iterazione 3, set di pesatura VIII, IX, X

Seti di pesatura	a ₁		a ₉	
	lc ₁	ld ₁	lc ₉	ld ₉
VIII			1,9	-0,204
IX	1,695	-0,146		
X				

4.3.6 Conclusioni

In questo caso studio è stata descritta una metodologia applicativa di un metodo di analisi multi-criteri che fornisce supporto ad un gestore di una rete stradale, in qualità di soggetto decisionale, per l'assegnazione di un ordine di priorità ai tronchi stradali sui quali programmare interventi infrastrutturali di sicurezza. Il metodo multi-criteri adottato per la risoluzione della problematica è il metodo dell'Analisi Concordante, derivato dal metodo Electre I e funzionale alla risoluzione di problematiche di scelta di un insieme di alternative.

In questo lavoro il metodo è stato utilizzato per definire una gerarchia in modo indiretto, così come specificato nel paragrafo 3.3 Analisi Concordante modificata con passaggio iterativo. Nel caso studio affrontato nel paragrafo 4.4, l'applicazione di una metodologia di analisi multi-criteri specifica per la risoluzione di problematiche di gerarchizzazione ha evidenziato la criticità rappresentata dalla necessità di definire, oltre alle soglie peso dei criteri, una serie di altri parametri che permettono di rappresentare la condizione di preferibilità di una alternativa

rispetto ad un'altra. Nei casi pratici applicative l'eccessivo numero di soglie risulta di difficile attribuzione da parte del soggetto decisionale.

Il caso studio al quale questa metodologia è applicata, è rappresentato da una problematica di gerarchizzazione dei tronchi stradali omogenei di un'arteria stradale extraurbana, per individuare su quali programmare interventi prioritari di messa in sicurezza. Alla base del modello sono stati individuati 10 criteri di scelta, rispondenti al requisito di rappresentabilità delle condizioni di sicurezza e di facile reperibilità. L'arteria stradale è stata divisa in 11 differenti tronchi stradali per indentificare, in un ordine gerarchico, quelli con le peggiori condizioni di sicurezza che richiedono interventi infrastrutturali prioritati.

Secondo i risultati delle analisi, il segmento classificato con le peggiori condizioni secondo i criteri di scelta è quello denominato a_{12} . In accordo con la specificazione del modello adottato, l'algoritmo dell'analisi a criteri multipli è stato ripetuto sull'insieme decisionale estraendo da questo l'elemento a_{12} . Lo svolgimento delle iterazioni ha prodotto un ordinamento gerarchico parziale dato dal tronco a_{12} in prima posizione, dal tronco a_8 in seconda posizione e dal tronco a_1 in terza posizione

Questa tecnica permette di affrontare in modo semplificato sia problematiche di scelta che problematiche di gerarchizzazione, generalmente trattate e analizzate con tecniche più complesse in termini di capacità computazionale, come nel metodo Electre III attraverso l'introduzione di numero elevato di soglie che il soggetto decisionale deve definire per rappresentare la preferibilità tra due alternative.

4.4 UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI BASATO SUL METODO ELECTRE III PER LE ANALISI DI SICUREZZA STRADALE

Basato sul lavoro presentato in (Fancello, Carta, & Fadda, 2014)

4.4.1 Introduzione

Tra i campi di indagine inerenti il settore dei trasporti stradali, la sicurezza sta assumendo un'importanza sempre maggiore. Nell'anno 2010 in Italia si sono verificati 212'997 incidenti stradali che hanno provocato lesioni alle persone (ISTAT, 2016), con un conseguente costo sociale dell'incidentalità pari a 28,5 miliardi di euro (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2012). L'anno 2011 è stato caratterizzato dal lancio del programma "UN Decade of Action for Road Safety", in quella occasione le Nazioni Unite hanno richiamato l'attenzione verso un reale miglioramento delle condizioni di sicurezza stradale e lo sviluppo di Piani Nazionali di sicurezza, per il decennio 2011-2020. Per rispondere in modo adeguato agli obiettivi preposti dal Programma, nel 2011 diverse Nazioni hanno realizzato nuove strategie di sicurezza stradale o hanno aggiornato i loro programmi esistenti in tema di sicurezza stradale (OECD, 2013). Uno tra gli obiettivi indicati nel documento della Commissione Europea "Towards a European road safety area: policy orientations on road safety 2011-2020", riguarda l'adeguamento delle infrastrutture stradali per renderle più sicure.

Per ridurre l'impatto che l'incidentalità produce in termini di costo sociale ed umano, la sicurezza stradale deve rappresentare un elemento fondamentale da considerare in tutte le fasi della pianificazione delle reti di trasporto. Le analisi sulle condizioni di sicurezza dei tronchi stradali mettono in evidenza quali caratteristiche influenzano il verificarsi degli eventi ledenti e la gravità delle conseguenze sugli utenti della strada. Le verifiche permettono anche di definire quali azioni sono necessarie per mitigare gli effetti negativi. Una basso livello di sicurezza stradale aumenta gli incidenti e di conseguenza costi associati alle lesioni fisiche conseguenti, subite da pedoni, conducenti e passeggeri coinvolti in questi eventi. Le autorità di gestione delle strade hanno la responsabilità di adottare le necessarie misure per assicurare un adeguato livello di sicurezza delle reti di trasporto.

In questo caso applicativo vengono confrontate le condizioni di sicurezza di un insieme di elementi della rete stradale, in funzione dell'entità del traffico circolante, delle caratteristiche

geometriche della strada e dei dati storici relativi all'incidentalità pregressa, per valutare quale elemento richiede interventi infrastrutturali di messa in sicurezza e adeguamento.

La ricerca bibliografica nella letteratura scientifica ha fatto emergere le caratteristiche del flusso di traffico che hanno un effetto rilevante nei confronti del livello di sicurezza stradale (Karlaftis & Golias, 2002). Queste includono la presenza di veicoli pesanti all'interno della corrente di traffico, il volume di traffico e la densità veicolare (Martin, 2002). Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche, si determina un riscontro nei seguenti parametri: larghezza della corsia, presenza della banchina, curvatura, la regolarità della superficie (Zegeer, Deen, & Mayes, 1980).

Gli interventi relativi a garantire maggiori condizioni di sicurezza delle infrastrutture stradali devono essere pianificati dalle autorità competenti sulla base dell'entità delle risorse disponibili (Yu, 1973). Nel caso in cui i fondi non siano sufficienti per coprire tutti gli interventi richiesti per ripristinare le condizioni di sicurezza nella rete stradale di competenza, in quel caso diventa opportuno disporre di uno strumento che supporti il soggetto decisionale nella gerarchizzazione degli elementi dell'infrastruttura secondo le condizioni di sicurezza. In tal modo, la priorità verrà assegnata agli interventi sulla rete stradale con le peggiori condizioni di sicurezza e dove il rischio di incidente è maggiore. Pertanto è importante che, supportate da tale strumento, le autorità competenti possano intervenire su quelle sezioni della rete di trasporto che ricevono una priorità maggiore dall'analisi gerarchica condotta in accordo con specifici criteri di sicurezza (Dell'Acqua, De Luca, & Mauro, 2011). Questa procedura richiede uno strumento di supporto alle decisioni capace di confrontare le condizioni di differenti sezioni stradali e supportare la scelta degli elementi della rete sui quali attuare gli interventi. Un certo numero di studi pubblicati affrontano le condizioni delle infrastrutture stradali sia in termini generali e in relazione in particolare alla sicurezza. Fierek descrive un sistema di pianificazione di un sistema di trasporto urbano integrato basato su una macro-simulazione, valutando scenari differenti mediante analisi multi-selezione utilizzando metodo Electre III (Fierek & Zak, 2012). Fancello propone una metodologia per valutare la funzionalità di rete analizzando diversi aspetti che interessano comunemente le condizioni di funzionamento, come il flusso del traffico, la sicurezza, l'accessibilità e l'impatto ambientale (Fancello, Carta, & Fadda, 2014).

Nell'area specifica della sicurezza stradale, Dell'Acqua presenta un modello funzionale alla classificazione dei punti neri delle reti stradali utilizzando una metodologia di supporto alle decisioni basata sulle tecniche di cluster analysis. Con questo sistema è possibile identificare e gerarchizzare tratti stradali e definire le condizioni per un sistema di infrastrutture finalizzate a ridurre il rischio di incidenti (Dell'Acqua, De Luca, & Mauro, 2011). Greibe propone un modello di previsione del numero di incidenti atteso nelle intersezioni e nei rami stradali. Il modello può essere utilizzato per identificare i fattori che influenzano la sicurezza stradale, in particolare per l'identificazione di "punti neri" e per sostenere l'analisi della sicurezza di rete intrapresa da autorità stradali locali (Greibe, 2003).

4.4.2 Metodologia

La metodologia utilizzata per lo svolgimento dell'analisi multi-criteria in questo contesto è quella denominata Electre III (Roy, 1978), specificata nel paragrafo 3.5 "Electre III". Questa metodologia è stata utilizzata per risolvere una problematica di gerarchizzazione.

4.4.3 Applicazione

Questa metodologia è stata applicata ad un caso studio reale. È stato analizzato un sistema stradale extraurbano in Sardegna (Italia). Il sistema consiste in una arteria stradale principale che corre lungo la lunghezza dell'isola. Questa strada principale è stata divisa in 10 sezioni omogenee a_i , $1 \leq i \leq 10$. Per valutare le condizioni di sicurezza di ciascun tronco stradale a_i , sono stati definiti sei criteri di sicurezza c_j , $1 \leq j \leq 6$. Questi criteri c_j sono stati determinati attraverso indagini dirette e analisi dei dati storici dei sinistri stradali.

c_1 , fattore dell'ora di punta (PHF), rapporto tra il volume orario di traffico registrato durante l'ora di punta e la massima portata registrata nell'intervallo elementare di 15 minuti ragguagliata all'ora; utilizzato come misura della variazione della domanda all'interno dell'ora di punta (Transportation Research Board, 2010);

c_2 , %hv, % di veicoli pesanti all'interno della corrente di traffico (Transportation Research Board, 2010);

c_3 , grado di saturazione, rapporto tra volume e capacità (v/c) (Transportation Research Board, 2010);

c_4 , fattore di fattore correttivo per larghezza della corsia (fW), Il fattore correttivo per larghezza della corsia considera l'impatto di una sezione minore delle condizioni standard pari a 3.6 m, sul flusso di saturazione (Transportation Research Board, 2010);

c_5 , potenziale di sicurezza (SAPO), definite come la somma del costo sociale degli incidenti per lunghezza chilometrica del tratto stradale omogeneo considerato, rappresenta una misura di densità di costo (European Commission, 2003);

c_6 , tasso di incidenti (Tif), rapporto tra il numero di incidenti e il flusso veicolare moltiplicato per la lunghezza chilometrica del tratto stradale omogeneo considerato (Elvik, Hoyer, Vaa, & Sorensen, 2009);

Ciascun criterio c_j ha un direzione di preferenza crescente se i valori più alti sono i più critici dal punto di vista della sicurezza stradale, per esempio se l'obiettivo è di massimizzare il criterio j . Viceversa, la direzione di preferenza decresce se i valori più bassi sono i più critici e l'obiettivo è di minimizzare il criterio j .

Questo metodo richiede che per ciascun criterio c_j vengano specificati i seguenti parametri: peso w_j , coefficiente di indifferenza α_p e β_p , coefficienti di preferenza α_q e β_q e soglia di veto v_j . La soglia di veto v_j non è stata considerata nella presente analisi. I valori dei parametri sono stati assegnati sulla base delle preferenze del decisore che utilizza il modello di supporto alle decisioni per identificare quelle parti della infrastrutture stradali con le condizioni di sicurezza più critiche, in linea con l'obiettivo del presente lavoro.

I valori dei parametri sono mostrati nella seguente tabella dove il set di pesi è definito dall'espressione $s_1 = (0,1; 0,1; 0,1; 0,2; 0,25; 0,25)$

Tabella 15 - Matrice decisionale

Criteri	pesi	Direzione di preferenza	Coefficienti di indifferenza		Coefficienti di preferenza	
			α_p	β_p	α_q	β_q
c_j	w_j					
c_1	0,1	discendente	0,025	0	0,025	0
c_2	0,1	ascendente	0,050	0	0,050	0
c_3	0,1	ascendente	0,025	0	0,025	0
c_4	0,2	discendente	0,100	0	0,100	0
c_5	0,25	ascendente	0,020	0	0,020	0
c_6	0,25	ascendente	0,020	0	0,020	0

Tabella dei gradi di credibilità $S(a,b)$:

Tabella 16 - Gradi di credibilità

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
a_1	1	0,9	0,75	1	0,5	0,4	0,75	0,75	0,75	0,75
a_2	0,5	1	0,75	0,75	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
a_3	0,55	0,55	1	1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
a_4	0,3	0,55	0,4	1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
a_5	0,8	0,8	0,9	0,9	1	0,3	0,9	0,55	0,8	0,8
a_6	0,8	0,8	1	1	1	1	1	0,75	1	1
a_7	0,45	0,7	1	1	0,5	0,4	1	0,4	0,9	0,65
a_8	0,45	0,7	1	1	0,75	0,55	0,9	1	1	1
a_9	0,45	0,45	1	1	0,5	0,3	0,65	0,3	1	0,75
a_{10}	0,45	0,45	0,9	1	0,5	0,3	0,65	0,3	0,55	1

L'applicazione del modello di analisi multi-criteria determina la gerarchia di miglior compromesso di alternative, dove ogni tronco stradale è posizionato in ordine discendente per condizioni di sicurezza, da quello che presenta le condizioni di sicurezza maggiormente critiche (a_6), a quello che presenta le condizioni meno critiche (a_4).

Alle alternative a_1 e a_8 viene assegnata la stessa posizione nella scala gerarchica e vengono entrambe posizionate al secondo posto, in modo analogo a quanto avviene per le alternative a_2 , a_7 e a_{10} posizionate tutte in quarta posizione.

La tabella seguente mostra la gerarchizzazione finale.

Tabella 17 - Gerarchia di miglior compromesso ottenuta con il set di pesi s_1

Posto	a_i
1	a_6
2	a_1, a_8
3	a_5
4	a_2, a_7, a_{10}
5	a_9
6	a_3
7	a_4

Per verificare la robustezza dei risultati ottenuti, è stata condotta un'analisi di sensitività. E' stata verificata la nuova gerarchia di miglior compromesso in funzione di variazioni dei pesi w_j assegnati ai criteri.

Per valutare in che modo la variazione nei pesi assegnati a ciascun criterio condiziona la gerarchia di miglior compromesso, i pesi sono stati variare alternativamente secondo schemi prestabiliti. Per limitare la variabilità dovuta all'assegnazione dei pesi ai sei criteri, è stata introdotta la semplificazione di raggruppare i criteri in tre macrocriteri z_k , $k = 1, \dots, 3$ secondo le caratteristiche omogenee elencate nel seguito.

$$z_1 = \{g_1, g_2, g_3\} \text{ caratteristiche di deflusso} \quad (4.4.1)$$

$$z_2 = \{g_4\} \text{ caratteristiche geometriche} \quad (4.4.2)$$

$$z_3 = \{g_5, g_6\} \text{ dati storici di incidentalità} \quad (4.4.3)$$

I pesi ϑ_k , $k=1, \dots, 3$ dei tre macrocriteri sono stati determinati come indicato nel seguito

$$\vartheta_1 = w_1 + w_2 + w_3 \quad (4.4.4)$$

$$\text{con } w_1 = w_2 = w_3 \quad (4.4.5)$$

$$\vartheta_2 = w_4 \quad (4.4.6)$$

$$\vartheta_3 = w_5 + w_6 + w_7 \quad (4.4.7)$$

$$\text{con } w_5 = w_6 \quad (4.4.8)$$

Sono stati definiti tre set di pesi, P_1, P_2, P_3 . Per ciascun set sono state testate sei combinazioni differenti di pesi $(s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7)$, dove i pesi ϑ_k dei macrocriteri z_k sono stati alternativamente incrementati e decrementati. Nel primo set, P_1 , i pesi sono stati fatti variare da -25% a +25%, nel secondo set, P_2 , sono stati fatti variare da -35% a +35% e nell'ultimo, P_3 , da -50% to +50%, per un totale di 36 combinazioni.

I set di pesi sono rappresentati nelle tabelle seguenti.

Tabella 18 - Set di pesi P₁, variazione da -25% a +25%

	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7
ϑ_1	$0,75 \cdot (\vartheta_1)_{s_1}$	$1,25 \cdot (\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$
ϑ_2	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$0,75 \cdot (\vartheta_2)_{s_1}$	$1,25 \cdot (\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$
ϑ_3	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$0,75 \cdot (\vartheta_3)_{s_1}$	$1,25 \cdot (\vartheta_3)_{s_1}$

Tabella 19 - Set di pesi P₂, variazione da -35% a +35%

	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7
ϑ_1	$0,65 \cdot (\vartheta_1)_{s_1}$	$1,35 \cdot (\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$
ϑ_2	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$0,65 \cdot (\vartheta_2)_{s_1}$	$1,35 \cdot (\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$
ϑ_3	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$0,65 \cdot (\vartheta_3)_{s_1}$	$1,35 \cdot (\vartheta_3)_{s_1}$

Tabella 20 - Set di pesi P₃, variazione da -50% a +50%

	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7
ϑ_1	$0,50 \cdot (\vartheta_1)_{s_1}$	$1,50 \cdot (\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$	$(\vartheta_1)_{s_1}$
ϑ_2	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$0,50 \cdot (\vartheta_2)_{s_1}$	$1,50 \cdot (\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$	$(\vartheta_2)_{s_1}$
ϑ_3	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$(\vartheta_3)_{s_1}$	$0,50 \cdot (\vartheta_3)_{s_1}$	$1,50 \cdot (\vartheta_3)_{s_1}$

Quando il peso ϑ_1 del macrocriterio z_1 viene decrementato del 35%, le alternative a5 e a7 acquisiscono una posizione gerarchica superiore mentre l'alternativa a1 perde una posizione nella gerarchia di miglior compromesso. Una situazione analoga accade quando il peso ϑ_1 del macrocriterio z_1 viene decrementato del 50%, ma in questo caso anche l'alternativa a2 perde una posizione. Quando il peso ϑ_3 del macrocriterio z_3 viene ridotto del 50%, l'alternativa a9 acquisisce una posizione nella gerarchia di miglior compromesso, l'alternativa a10 scende di una posizione mentre l'alternativa a7 scende di due posizioni. Le ulteriori variazioni nello schema di pesatura adottato, indicate nelle tabelle sopra, non modificano la gerarchia di miglior compromesso rispetto alla condizione ottenuta con il set di pesatura s_1 originariamente assegnato.

4.4.4 Conclusioni

Nel caso studio descritto nel presente paragrafo è stato presentato l'utilizzo di un modello di supporto alle decisioni per la programmazione degli interventi di sicurezza nelle reti stradali. Questo modello fornisce supporto un amministratore di una rete stradale nella costruzione di

una gerarchia di elementi stradali realizzata secondo criteri di sicurezza. Applicando questo modello è possibile allocare i fondi disponibili in modo prioritario su quegli elementi della rete che presentano la maggiore criticità, in funzione dei criteri di valutazione scelti. Nel caso in esame è stato applicato ad un caso di studio riguardante un'arteria extraurbana in Sardegna, in Italia. In conformità con i criteri di valutazione e i pesi a loro assegnati, i dieci tratti stradali in cui questa arteria è stata suddivisa, sono stati gerarchizzati secondo condizioni di sicurezza. Nel caso specifico è stato determinato che la massima priorità deve essere assegnata per interventi relativi all'elemento denominato a_6 . Attraverso questa metodologia i fondi disponibili per gli interventi di sicurezza dovrebbero essere stanziati in accordo con la gerarchia determinata dal modello. L'ulteriore analisi di sensitività, effettuata per vedere la variazione della gerarchia di miglior compromesso in funzione di variazioni più e meno marcate dello schema di pesatura assegnato, ha mostrato come la gerarchia ottenuta con lo schema di pesi originariamente assegnato secondo le istanze del soggetto decisionale, rappresenta una soluzione stabile in quanto la variazione del peso dei criteri, anche in misura rilevante, determina solo piccoli discostamenti nella posizione degli elementi della rete nella gerarchia di miglior compromesso. Piccole variazioni si registrano in particolare quando si fa variare il peso ϑ_1 del macrocriterio relativo al flusso di traffico z_1 , in particolare accade per variazioni negative del 35%. Ulteriori modifiche si registrano per variazioni ancora più marcate, pari a -50%, che riguardano il macrocriterio ϑ_3 relativo alla sicurezza.

4.5 GERARCHIZZAZIONE DI INTERSEZIONI IN UNA RETE STRADALE URBANA

4.5.1 Introduzione

In questo paragrafo viene presentato un caso studio relativo ad una problematica multi-criteria finalizzata alla gerarchizzazione di un insieme di intersezioni stradali urbane, con lo scopo di assegnare la priorità di intervento alle intersezioni caratterizzate da un livello elevato di incidentalità e dove le caratteristiche geometriche e di deflusso sono tali da determinare un rischio potenziale di insorgenza di ulteriori eventi ledenti. La metodologia presentata risolve questa problematica confrontando le prestazioni raggiunte da ciascuna intersezione appartenente all'insieme decisionale, sulla base di un insieme di criteri di scelta predefiniti. L'insieme delle intersezioni viene ordinato gerarchicamente, dalla prima posizione occupata dall'intersezione che richiede una priorità di intervento più alta, all'ultima posizione occupata da quella che richiede una priorità di intervento inferiore.

Questa metodologia può essere utilizzata da un valutatore per fornire supporto all'amministratore di una rete stradale, in qualità di soggetto decisionale, per consentirgli di individuare su quali intersezioni, tra quelle considerate nell'insieme decisionale, programmare interventi di riqualificazione e azioni di intervento coerentemente con la scala di priorità fornita dal modello di analisi multi-criteria e per diminuire il livello di incidentalità attraverso uno strumento capace di giustificare in modo oggettivo i risultati dell'attività decisionale.

Assumendo il fatto che l'Amministratore della rete abbia a disposizione una quantità limitata di fondi per la programmazione e la realizzazione di interventi di riqualificazione e ripristino delle condizioni di sicurezza della rete stradale, utilizzando questa metodologia risulta possibile indirizzare queste disponibilità finanziarie in modo prioritario quelle intersezioni che sono risultate ritenute critiche sotto gli aspetti citati, e che saranno disposte nelle posizioni più alte dell'elenco gerarchico, dall'analisi multi-criteria.

4.5.2 Metodologie

La letteratura scientifica presenta differenti metodologie di supporto alle decisioni che adottano un approccio di tipo multi-criteria, finalizzate alla costruzione di un ordine gerarchico di alternative sulla base di un insieme di criteri di valutazione. Per l'applicazione di questo caso

studio sono state considerate le seguenti metodologie: Vikor, specificata nel paragrafo 3.6 e definita in (Opricovic, 1998), Topsis, specificata nel paragrafo 3.7 e definita in (Chen, Hwang, & Hwang, 1992) e l'Analisi Concordante modificata con valutazione della distanza, presentata nel paragrafo 3.4. Tutti questi metodi sono funzionali alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione attraverso il confronto tra le prestazioni raggiunte da ciascuna alternativa, in corrispondenza di un insieme di differenti funzioni obiettivo. La congruenza degli obiettivi preposti dalle tre metodologie considerate, ha consentito di valutare sia i risultati ottenuti separatamente da ciascuna di esse sia di effettuare un confronto tra i diversi ordini gerarchici che sono stati costruiti da ciascuno dei tre metodi.

4.5.3 Selezione dei criteri

Quando si misurano le condizioni di sicurezza di un elemento della rete stradale, è riduttivo effettuare le valutazioni esclusivamente utilizzando come unica dimensione quella del numero di eventi ledenti occorsi in quell'elemento in un intervallo di tempo pregresso. Il numero di eventi è il risultato dell'interazione tra i molteplici parametri che influiscono sulla sicurezza stradale e non è esclusivamente determinato da solo un fattore (Sarrazin & De Smet, 2011). Questa condizione è esemplificata dal triangolo della road safety (Sarrazin & De Smet, 2016) , (Colonna, 2002), dove ai tre vertici sono rappresentate le seguenti dimensioni: veicolo, conducente e caratteristiche della strada e le connessioni tra i vertici sono costituite dai fattori umani, nella connessione tra strada e conducente, dai fattori del veicolo, nella connessione tra conducente e veicolo e dai fattori fisici, nella connessione tra veicolo e strada.

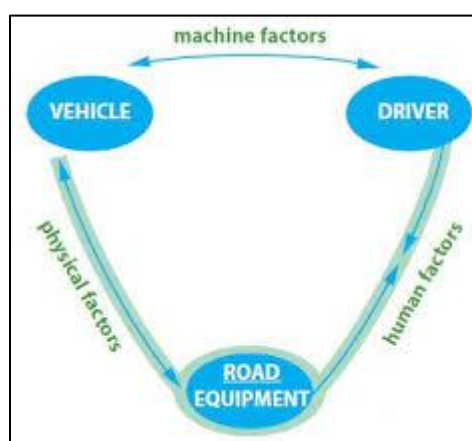


Figura 7 Triangolo della sicurezza stradale (Sarrazin & De Smet, 2015)

Numerosi autori hanno proposto insiemi di fattori capaci di misurare le condizioni della sicurezza stradale. Per individuare quali indicatori risultano rilevanti per la rappresentazione delle condizioni di sicurezza, è stata condotta una ricerca bibliografica nella letteratura scientifica nazionale ed internazionale. Tra i molteplici indicatori la letteratura evidenzia in modo particolare il numero di rami afferenti nelle intersezioni (Wong, Sze, & Li, 2007), il flusso di traffico circolante, la larghezza delle corsie, la presenza e la larghezza di banchine, la pendenza della strada, la densità degli accessi laterali, la segnaletica orizzontale e verticale (Hermans, Van Den Bossche, & Wets, 2008) (Coll, Moutari, & Marshall, 2013). Una analisi complessiva degli indicatori relativi alla sicurezza stradale è stata presentata in (Elvik, Høy, Vaa, & Sørensen, 2009) che in "The handbook of road safety measures" specificano gli indicatori chiave nel settore della sicurezza stradale. Altre misure sono specificate da Hermans, che presenta un processo di costruzione per determinare le prestazioni di sicurezza stradali, considerando le seguenti aree: alcol e droghe, sistemi di protezione, veicolo, velocità, ora del giorno, illuminazione stradale e cure traumatologiche (Hermans, Van Den Bossche, & Wets, 2008). Nel lavoro intitolato "Indicators for traffic safety: a new yardstick for safety" Janssen propone un set di nove criteri specifici per la sicurezza nelle intersezioni come volume medio veicolare, incidenti per intersezione, feriti e morti per incidente (Janssen, 1991).

Non tutti gli indicatori proposti nella letteratura scientifica sono applicabili al presente caso studio. L'insieme degli indicatori da utilizzare alla base del modello di analisi multi-criteria, oltre ad essere significativi dei diversi aspetti che condizionano la sicurezza stradale evidenziati negli studi bibliografici citati sopra, devono anche rispondere al requisito di facile utilizzabilità pratica. Questo dipende direttamente dalle finalità che questo studio si propone. Dal momento che l'analisi è finalizzata alla programmazione degli interventi di sicurezza stradale mediante adeguamenti infrastrutturali, gli indicatori dovranno riguardare unicamente questa sfera. Esula dal presente lavoro l'analisi delle condizioni di sicurezza derivate dalle sfere delle caratteristiche del veicolo e delle condizioni del conducente, per le quali occorrerebbe effettuare analisi specifiche, da un lato sulla progettazione dei componenti del veicolo, tra i quali i sistemi di sicurezza passiva, dall'altro le condizioni di guida del conducente, attraverso studi specifici nel campo dei fattori umani. Inoltre, nel caso in esame, il valutatore deve basare l'analisi multi-criteria su indicatori di facile reperibilità, che siano già a disposizione dell'Amministratore della rete o facilmente reperibili mediante indagini in loco. Sono stati privilegiati in questo senso gli

indicatori relativi alle condizioni geometriche e di traffico, oltre ad essere scelti come indicatori quelli relativi alla sinistrosità pregressa che misurano il livello dell'incidentalità accaduta nel punto in uno specifico periodo di riferimento.

Gli indicatori chiave ritenuti importanti per lo svolgimento della presente ricerca sono presentati nell'elenco seguente. Ciascun indicatore selezionato è rappresentato da un valore scalare che quantifica la misura dell'indicatore per ciascuna alternativa e da una direzione di preferenza; valori più alti del criterio sono preferiti ai bassi valori se la direzione di preferenza è ascendente o valori più bassi del criterio sono preferiti ai valori alti se la direzione di preferenza è discendente.

c_1 , distanza di visibilità dall'accesso. Il conducente che si immette nell'intersezione deve avere una adeguata visibilità dell'area, per avere la visibilità dei veicoli che si immettono nella stessa area dagli altri rami afferenti e poter evitare collisioni. Questo indicatore assume valori numerici da 1 a 4 e rappresenta la media delle condizioni di visibilità presenti in ciascun accesso: assente (1), povero (2), medio (3), buono (4). Questo criterio è calcolato attraverso misure dirette. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore minimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto discendente.

$$c_1 = \frac{1}{n} \sum_i d_i \quad (4.5.1)$$

Dove d_i è un valore numerico che rappresenta la condizione di visibilità da ciascun accesso in ingresso nell'area dell'intersezione, secondo i parametri numerici descritti sopra, e n è il numero degli accessi in ingresso nell'area dell'intersezione.

c_2 , segnaletica orizzontale e verticale. Questo indicatore rappresenta le condizioni della segnaletica stradale orizzontale e verticale, assume un valore numerico crescente da 1 a 4 e rappresenta la media delle condizioni della segnaletica nell'area dell'intersezione: assente (1), povero (2), medio (3), buono (4). Questo criterio è calcolato attraverso indagini in loco. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore minimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto discendente.

$$c_2 = s \quad (4.5.2)$$

Dove s è un valore numerico che rappresenta la condizione della segnaletica nell'area dell'intersezione, secondo i parametri numerici descritti sopra.

c_3 , illuminazione nelle intersezioni. Questo indicatore rappresenta le condizioni dell'illuminazione dell'area dell'intersezione e ha un valore crescente da 1 a 4 in accordo con le condizioni crescenti dello stato di illuminazione: assente (1), povero (2), medio (3), buono (4). Questo criterio è calcolato attraverso indagini in loco. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore minimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto discendente.

$$c_3 = i \quad (4.5.3)$$

Dove i è un valore numerico che rappresenta la condizione dell'illuminazione nell'area dell'intersezione, secondo i parametri numerici descritti sopra.

c_4 , stato di manutenzione della superficie stradale. La presenza di buche e fratture nella pavimentazione stradale condiziona il livello di sicurezza. L'indicatore sulle condizioni di manutenzione della superficie stradale ha un valore numerico crescente da 1 a 4, in accordo con valori crescenti dello stato della pavimentazione: critico (1), povero (2), medio (3), buono (4). Questo criterio è calcolato attraverso indagini in loco. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore minimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto discendente.

$$c_4 = m \quad (4.5.4)$$

Dove m è un valore numerico che rappresenta la condizione dello stato di manutenzione della superficie stradale, secondo i parametri numerici descritti sopra.

c_5 , densità dei punti di conflitto. Questo indicatore è calcolato attraverso il rapporto tra il numero di punti di conflitto tra le correnti veicolari che si generano nell'area dell'intersezione e l'area dell'intersezione. Questo criterio è calcolato attraverso l'analisi delle traiettorie generate dalle correnti di traffico veicolare. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore massimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto ascendente.

$$c_5 = \frac{pc}{A} \left[\frac{1}{m^2} \right] \quad (4.5.5)$$

Dove pc è un valore numerico che rappresenta il numero di punti di conflitto di intersezione, confluenza e diversione che si registrano tra le manovre veicolari nell'area dell'intersezione e A rappresenta l'area dell'intersezione in m².

c₆, numero dei veicoli in ingresso nell'intersezione. Questo indicatore è definito dalla somma del flusso di traffico veicolare orario in ingresso nell'area dell'intersezione durante l'ora di punta da tutti gli accessi. Questo criterio è determinato attraverso conteggi di traffico eseguiti in loco. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore massimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto ascendente.

$$c_6 = \sum_i f_i [av/h] \quad (4.5.6)$$

Dove f_i, è il flusso veicolare orario registrato in ciascun degli accessi i in ingresso nell'area dell'intersezione.

c₇, percentuale di veicoli pesanti. Questo indicatore è definito come la percentuale di veicoli pesanti nelle correnti veicolari che si immettono nell'area dell'intersezione nell'ora di punta. Il criterio è determinato attraverso conteggi di traffico eseguiti in loco. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore massimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto ascendente.

$$c_7 = \frac{\sum_i hv_i}{\sum_i f_i} \cdot 100 \quad (4.5.7)$$

Dove hv_i è il numero di veicoli pesanti in ingresso da ogni accesso i nell'area dell'intersezione e f_i è il flusso veicolare orario registrato in ciascun degli accessi i in ingresso nell'area dell'intersezione.

c₈, tasso di incidentalità, questo indicatore è calcolato attraverso il rapporto tra il numero di incidenti nell'intersezione e il volume veicolare in ingresso da tutti i rami dell'intersezione. Questo criterio è calcolato attraverso misure di dati determinata da contatori di traffico e dati storici sugli incidenti accaduti nel quinquennio 2009-2013. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello

di individuare le intersezioni con il valore massimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto ascendente.

$$c_8 = \frac{i}{\sum_i f_i} \quad (4.5.8)$$

Dove i è il numero di incidenti accaduti nell'intersezione dal 2009 al 2013 e f_i è il flusso veicolare orario registrato in ciascun degli accessi i in ingresso nell'area dell'intersezione.

c_9 , tasso di ferimento, questo indicatore è calcolato attraverso il rapporto tra il numero di feriti in incidenti stradali nell'intersezione e il numero di incidenti nell'intersezione, accaduti nel quinquennio 2009-2013. Per gerarchizzare le intersezioni assegnando maggiore priorità a quelle con le peggiori condizioni di sicurezza, l'obiettivo è quello di individuare le intersezioni con il valore massimo del criterio, la direzione di preferenza sarà pertanto ascendente.

$$c_9 = \frac{fer}{i} \quad (4.5.9)$$

Dove fer è il numero di feriti in incidenti stradali registrati nell'intersezione nel quinquennio 2009-2013 e i è il numero di incidenti registrati nello stesso luogo e periodo temporale. L'elenco dei criteri è elencato nella tabella seguente dove sono rappresentate l'espressione matematiche e le unità dimensionali.

Tabella 21 - Funzioni obiettivo

	espressione	dimensione
c_1	$\frac{1}{n} \sum_i d_i$	[adimensionale]
c_2	s	[adimensionale]
c_3	i	[adimensionale]
c_4	m	[adimensionale]
c_5	$\frac{pc}{A}$	[1/m ²]
c_6	$\sum_i f_i$	[av/h]
c_7	$\frac{\sum_i hv_i}{\sum_i f_i} \cdot 100$	[adimensionale]
c_8	$\frac{i}{\sum_i f_i}$	[adimensionale]
c_9	$\frac{fer}{i}$	[adimensionale]

4.5.4 Applicazione

I tre metodi di analisi multi-criteria: VIKOR, TOPSIS e l'Analisi Concordante modificata con valutazione della distanza, sono stati applicati ad un caso studio reale per valutare quali priorità di intervento assegnare ad un insieme di intersezioni stradali nella rete urbana della città di Villacidro, localizzata in Sardegna, la cui posizione è rappresentata da un cerchio blu all'interno del territorio regionale nella figura seguente.



Figura 8 Localizzazione città di Villacidro (fonte: google maps)

Utilizzando questi metodi di analisi è stato ordinato gerarchicamente un insieme decisionale costituito da intersezioni della città di Villacidro, dalla prima posizione occupata dall'intersezione che richiede maggiore priorità di intervento, all'ultima posizione occupata da quella con la priorità di intervento più bassa.

L'ordinamento è stato realizzato sulla base delle prestazioni che le intersezioni hanno registrato in corrispondenza dei nove criteri di valutazione (c_1, \dots, c_9) descritti sopra. La rete urbana di Villacidro ha un'estensione di circa 50 km ed è composta da circa 550 archi omogenei e 300 intersezioni. Tra tutte le intersezioni presenti nell'area urbana, l'amministratore della rete ha

richiesto lo svolgimento dell'analisi multi-criteria su un sottoinsieme specifico di sei intersezioni. Nella figura seguente viene mostrato il grafo della rete stradale di Villacidro dove le sei intersezioni appartenenti all'insieme decisionale sono state evidenziate con punti di colore rosso, mentre la descrizione della localizzazione è mostrata nella tabella seguente.



Figura 9 Rete stradale città di Villacidro

	localizzazione
a ₁) 1	Via Scuole – Via Don Bosco – Via G.M. Angioi
a ₂) 2	Piazza Lavatoio
a ₃) 3	Piazza Rondò
a ₄) 4	Via Repubblica – Via Mazzini
a ₅) 5	Via Regione Sarda – Via Repubblica
a ₆) 6	Via Parrocchia – Via Nazionale

Per ciascuna delle sei intersezioni appartenenti all'insieme decisionale, sono stati determinati i valori dei criteri. La matrice decisionale rappresentata nella tabella seguente mostra nelle righe le sei alternative (a₁, ..., a₆) mentre nelle colonne le 9 funzioni obiettivo (c₁, ..., c₉). I singoli

elementi della matrice rappresentano le prestazioni di ciascuna alternativa nei confronti di ciascun criterio.

Tabella 22 - Matrice decisionale

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
C ₁	2	2	3	2	4	4
C ₂	3	1	3	2	3	4
C ₃	2	3	3	2	3	3
C ₄	3	3	3	2	4	4
C ₅	0,058	0,0213	0,026	0,0367	0,0227	0,0175
C ₆	507	322	635	530	769	991
C ₇	4,2	4,5	4,2	4,1	4	3,9
C ₈	0,0039	0,0093	0,0047	0,0038	0,0026	0,005
C ₉	0	0	0,6667	1	1	0,2

Sulla base delle preferenze espresse dal soggetto decisionale, a ciascuna funzione obiettivo è stato assegnato un peso rappresentativo dell'importanza relativa nei confronti del raggiungimento degli obiettivi. Per semplificare e facilitare l'attività di assegnazione dei pesi, i criteri sono stati raggruppati in tre domini, caratteristiche geometriche D₁; caratteristiche della corrente di traffico D₂; dati storici sull'incidentalità D₃. Gli indicatori c₁, c₂, c₃, c₄ sono stati raggruppati nel primo dominio, gli indicatori c₅, c₆, c₇ nel secondo dominio, gli indicatori c₈, c₉ nel terzo dominio. A tutti i criteri raggruppati nello stesso dominio è stato assegnato un peso uguale, in modo che il soggetto decisionale sia chiamato a dichiarare una preferenza tra soli tre domini di criteri, al posto dei nove criteri singoli. Quando il numero di criteri è elevato, risulta difficile per il soggetto decisionale differenziare il grado di importanza da assegnare a ciascuno di essi. L'operazione di accorpamento dei criteri in domini ha consentito di diminuire il numero di parametri su cui si deve esprimere il soggetto decisionale e quindi di attribuire il peso a ciascuna funzione obiettivo con maggiore capacità di attribuire la giusta importanza ai diversi criteri, a fronte della semplificazione rappresentata dall'attribuzione dello stesso peso a tutti i criteri appartenenti allo stesso dominio.

Il vettore dei pesi è definito dalla seguente espressione:

$$w = (w_{D_1}, w_{D_2}, w_{D_3}) \quad (4.5.10)$$

Dove w_{D_1} rappresenta il peso del dominio D_1 , w_{D_2} rappresenta il peso del dominio D_2 , w_{D_3} rappresenta il peso del dominio D_3 ; w_{D_1} , w_{D_2} , w_{D_3} sono numeri reali non minori di 0 e non maggiori di 1, i cui valori sono vincolati dalla seguente espressione, che indica che la somma dei pesi assegnati alle tre aree di meta deve essere unitaria:

$$w_{D_1} + w_{D_2} + w_{D_3} = 1 \quad (4.5.11)$$

Il vettore dei pesi w_1 è definito sulla base delle preferenze del soggetto decisionale, che attribuisce a D_1 il valore di 0,25, a D_2 il valore di 0,25 a D_3 il valore di 0,50, riconoscendo al dominio dei dati storici sull'incidentalità (D_3) un'importanza doppia rispetto a quella espressa dal dominio delle caratteristiche geometriche (D_1) e a quello delle caratteristiche della corrente di traffico (D_2):

$$w_1 = (0,25; 0,25; 0,50) \quad (4.5.12)$$

Nel metodo VIKOR la costruzione della gerarchia finale prevede il confronto tra tre misure: S_i , R_i and Q_i . In accordo con l'algoritmo specificato nel paragrafo 3, la tabella seguente mostra i valori di S_i , R_i and Q_i , mentre la gerarchia finale è mostrata nella tabella seguente. Nella gerarchia ottenuta con il modello Vikor, l'ultima posizione è occupata dall'intersezione "a₆" (4° posizione) perché la condizione

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ. \quad (4.5.13)$$

Dove $A^{(2)}$ è l'alternativa con la seconda posizione nella lista per Q and $DQ=1/(J-1)$

non risulta soddisfatta per le intersezioni a_1 and a_5 e per questo motivo vengono escluse dalla gerarchia di miglior compromesso.

Tabella 23 - Matrice dei pesi

	w
C ₁	0,0625
C ₂	0,0625
C ₃	0,0625
C ₄	0,0625
C ₅	0,0833
C ₆	0,0833
C ₇	0,0833
C ₈	0,2500
C ₉	0,2500

Tabella 24 - Metodo Vikor, valori di S_i, R_i e Q_i

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
S _i	0,62	0,50	0,57	0,38	0,65	0,78
R _i	0,25	0,25	0,17	0,21	0,25	0,20
Q _i	0,81	0,65	0,24	0,22	0,84	0,68

Tabella 25 - Metodo Vikor, gerarchia di miglior compromesso

1a	a ₄
2a	a ₃
3a	a ₂
4a	a ₆

Nel metodo Topsis il ranking finale è costruito confrontando le misure della distanza più vicina dalla soluzione ideale e la distanza più lontana dalla soluzione peggiore ideale. In accordo con l'algoritmo specificato nel paragrafo 3, la tabella 2 mostra il valori della distanza relativa dall'alternativa ideale positiva e dall'alternativa ideale negativa mentre il ranking finale è mostrato nella tabella seguente.

Tabella 26 - Metodo Topsis, distanza relativa dall'alternativa ideale positiva e dall'alternativa ideale negativa

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
$S^-/(S_i^+ + S_i^-)$	0,28	0,43	0,46	0,63	0,45	0,26

Tabella 27 - Metodo Topsis, gerarchia di miglior compromesso

1	a ₄
2	a ₃
3	a ₅
4	a ₂
5	a ₁
6	a ₆

Il metodo dell'analisi Concordante non fornisce alcuna soluzione di miglior compromesso, perché nessuna alternativa ottiene un indice di dominanza della concordanza I_c positivo ed un indice di dominanza della discordanza I_d negativo. In questo caso nessuna alternativa viene individuata come soluzione di miglior compromesso. L'indice I_{c_i} e l'indice I_{d_i} , ottenuti per ciascuna alternativa a_i , sono mostrati nella tabella seguente.

Tabella 28 - Metodo Analisi Concordante, indici di dominanza della concordanza e di dominanza della discordanza

I_{c_1}	I_{d_1}	I_{c_2}	I_{d_2}	I_{c_3}	I_{d_3}	I_{c_4}	I_{d_4}	I_{c_5}	I_{d_5}	I_{c_6}	I_{d_6}
-0,48	0,07	0,44	0,39	0,65	0,21	1,27	0,85	-1,02	0,20	-0,85	-1,73

I differenti risultati ottenuti usando i tre metodi mostrano che il metodo dell'Analisi Concordante non identifica una gerarchia di miglior compromesso mentre le gerarchie ottenute attraverso i metodi Topsis e Vikor sono abbastanza coerenti tra loro. Entrambi i due metodi posizionano l'intersezione a_4 nel primo posto della gerarchia e l'intersezione a_3 in seconda posizione. L'intersezione a_2 è nella terza posizione nel ranking ottenuto con il metodo VIKOR e nella quarta con il metodo Topsis. L'intersezione a_6 si trova nella quarta posizione nel ranking del metodo Vikor e nella sesta nel metodo Topsis. Le intersezioni a_5 e a_1 sono rispettivamente in

terza e in quinta posizione nel Topsis ranking mentre non sono classificate nel ranking ottenuto con il metodo Vikor. La Figura seguente sintetizza il ranking ottenuto con i tre metodi, dove nell'asse delle ascisse sono riportate le sei intersezioni mentre nell'asse delle ordinate la posizione nella gerarchia di miglior compromesso raggiunta in ciascuno dei tre metodi utilizzati, in blu per l'analisi concordante, in rosso per il metodo Topsis e in viola per il metodo VIKOR.

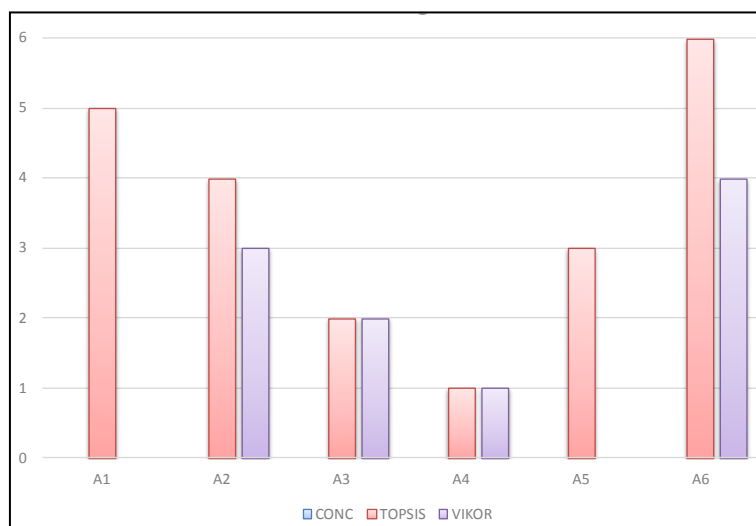


Figura 10 Caso studio intersezioni città di Villacidro. Gerarchia di miglior compromesso

4.5.5 Analisi di sensitività

Per verificare la robustezza dei risultati ottenuti utilizzando il vettore dei pesi definito dal soggetto decisionale (Sarrazin & De Smet, 2011), è stata condotta una analisi di sensitività. Le priorità relative dei criteri sono state modificate per verificare come questa modifica influenza la costruzione della gerarchia di miglior compromesso. Il peso di ciascun criterio che è stato raggruppato nel dominio D_1 è stato cambiato in un intervallo di valori compresi tra il 3% e il 12%, corrispondente ad una variazione dell'1%, dal 12% al 48%, per il dominio (il peso assegnato dal soggetto decisionale era pari al 25%). Il peso di ciascun criterio raggruppato nel dominio D_2 è cambiato in un intervallo dal 4% al 16%, corrispondente ad una variazione di un punto percentuale, dal 12% al 48%, per il dominio (il peso assegnato dal soggetto decisionale era pari al 25%). Il peso di ciascun criterio raggruppato nel dominio D_3 è cambiato in un intervallo compreso tra il 18% e il 38%, corrispondente ad una variazione dell'1%, dal 36% al 76%, per il

dominio (il peso assegnato dal soggetto decisionale era pari al 50%). Sono stati condotti complessivamente 840 test per ciascun metodo, in accordo con la relazione (4.5.11). I risultati forniti dal metodo dell'analisi Concordante sono mostrati nella tabella 7. L'intersezione con le peggiori condizioni di sicurezza (1°) è la a_3 nel 15% dei test, la a_1 nel 6% e la a_2 e la a_6 nell'1%.

Tabella 29 - Analisi di sensitività, metodo Analisi Concordante

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1°	6%	1%	15%	0%	0%	1%
2°	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3°	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4°	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5°	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6°	0%	0%	0%	0%	0%	0%

I risultati ottenuti con il metodo Vikor sono mostrati nella tabella 8. L'intersezione con le peggiori condizioni di sicurezza (1°) è la a_4 nel 70% dei test mentre è la a_3 nel rimanente 30%. In posizione 2° troviamo la alternativa a_3 nel 70% dei test mentre la a_4 nel 30%. Il 3° posto è occupato dall'alternativa a_2 nel 100% dei casi. Il 4° posto è occupato dall'alternativa a_6 nel 99% dei test e dall'alternativa a_1 nell'1%. L'ultima posizione (5° posto) è la a_1 nel 10% dei casi.

Tabella 30 - Analisi di sensitività, metodo Vikor

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1°	0%	0%	30%	70%	0%	0%
2°	0%	0%	70%	30%	0%	0%
3°	0%	100%	0%	0%	0%	0%
4°	1%	0%	0%	0%	0%	99%
5°	10%	0%	0%	0%	0%	0%
6°	0%	0%	0%	0%	0%	0%

L'intersezione stradale a_4 ha il peggior posto nel ranking nel 100% dei casi utilizzando il metodo Topsis. Il 2° posto è occupato dall'alternativa a_5 nel 44% dei casi, dall'alternativa a_3 nel 29% e dall'alternativa a_2 nel 27%. L'alternativa a_3 ha il 3° posto nel 71% dei casi, l'alternativa a_5 nel 21% dei casi e l'alternativa A_2 nell'8% del casi. Il 4° posto è occupato dall'alternativa a_2 nel 63% dei

test e dall'alternativa a_5 nel 36% e dall'alternativa a_1 nell'1%. Il 5° posto è occupato dall'alternativa a_1 nel 67% dei casi, dall'alternativa a_6 nel 32% dei casi e dall'alternativa a_2 nell'1%. Il 6° e ultimo posto è occupato dall'alternativa a_6 nel 68% dei test e dall'alternativa a_1 nel 32% dei test.

Tabella 31 - Analisi di sensitività, metodo Topsis

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1°	0%	0%	0%	100%	0%	0%
2°	0%	27%	29%	0%	44%	0%
3°	0%	8%	71%	0%	21%	0%
4°	1%	63%	0%	0%	36%	0%
5°	67%	1%	0%	0%	0%	32%
6°	32%	0%	0%	0%	0%	68%

4.5.6 Conclusioni

In questo caso applicativo sono state utilizzate tre metodologie di analisi a criteri multipli per supportare il Gestore della rete stradale Comunale della città di Villacidro, in Italia, in qualità di soggetto decisionale, in un'attività finalizzata ad individuare quali intersezioni stradali della rete di competenza risultano maggiormente pericolose dal punto di vista della sicurezza. I tre metodi utilizzati, Vikor, Topsis e Analisi Concordante modificata con valutazione della distanza, sono funzionali alla costruzione di una gerarchia di alternative. Il loro utilizzo si adatta al caso studio in esame in quanto consentono di ordinare un insieme di alternative sulla base di un insieme di criteri predefiniti. L'ordinamento delle intersezioni stradali secondo criteri di sicurezza, permette di individuare quelle intersezioni sulle quali indirizzare in modo prioritario la disponibilità dei fondi a favore di interventi prioritari infrastrutturali di messa in sicurezza per ridurre nel futuro, l'entità degli eventi ledenti registrati nel periodo di riferimento dal 2009 al 2013 utilizzato a base delle analisi.

Tutti i tre modelli si basano sullo stesso insieme di criteri, che sono stati scelti perché rispondenti a specifici requisiti:

- sono rappresentativi delle condizioni di sicurezza delle intersezioni e delle condizioni di incidentalità che si sono verificate nel tempo di riferimento pregresso;

- sono di facile elaborazione e si basano su dati che sono già nelle disponibilità dell'Amministrazione Comunale, o sono facilmente determinabili, e pertanto non richiedono ulteriori indagini per la loro elaborazione;

I risultati delle tre metodologie sono confrontabili tra loro perché i loro algoritmi si basano sul confronto a coppie di alternative in funzione delle prestazioni che raggiungono nei confronti nell'insieme di criteri di scelta, sulla base delle prestazioni viene costruita una gerarchia di miglior compromesso. Gli algoritmi sono specifici per ogni metodologia e non sempre forniscono risultati coerenti tra loro nella specificazione della gerarchia di miglior compromesso. In particolare, i risultati forniti dall'analisi concordante sono condizionati dalla necessità di determinare, per ciascuna alternativa, un indice di dominanza della concordanza positivo ed un indice di dominanza della discordanza negativo. Questa condizione non viene sempre rispettata per cui il metodo dell'Analisi Concordante, anche nella sua forma modificata con la valutazione della distanza tra gli indici di dominanza della concordanza e della discordanza, che permette di costruire ordini gerarchici, restituisce gerarchie vuote o incomplete. D'altra parte le altre due metodologie utilizzate per il confronto, Vikor e Topsis, forniscono risultati simili, in particolare per le posizioni più alte della gerarchia di miglior compromesso, cioè tendono a posizionare in modo congruente tra loro le stesse intersezioni nelle prime due posizioni della gerarchia. Questa tendenza viene confermata dalle elaborazioni compiute nell'analisi di sensitività, eseguita su oltre 840 test di sensitività per confermare la stabilità della soluzione ottenuta utilizzando il vettore dei pesi derivato dalle preferenze del soggetto decisionale.

5. UN NUOVO APPROCCIO PER L'ANALISI MULTI-CRITERIA: IL METODO MTA (MULTI-CRITERIA TRIGONOMETRIC APPROACH)

5.1 INTRODUZIONE

Nel capitolo 3 “Le tecniche di analisi” del presente lavoro di tesi, sono stati presentati differenti algoritmi di analisi multi-criteria applicati, nel successivo capitolo 4 “Applicazioni”, a casi studio reali o realistici, nel campo dei sistemi dei trasporti. Nel dettaglio, sono state presentate l'Analisi Concordante nel paragrafo 3.2 definita in (Giuliano, 1985), l'Analisi Concordante modificata con passaggio iterativo nel paragrafo 3.3 definita in (Fancello, Carta, & Fadda, 2015), l'Analisi Concordante modificata con valutazione della distanza nel paragrafo 3.4, il metodo Electre III nel paragrafo 3.5 definito in (Figueira, Mousseau, & Roy, 2005) per individuare lo scenario progettuale in grado di raggiungere il più elevato livello di prestazioni generali, considerando diversi aspetti che misurano le condizioni di mobilità o per individuare quali tronchi omogenei di una rete stradale sono caratterizzati dalle condizioni di sicurezza più critiche; i metodi Vikor nel paragrafo 3.6 definito in (Opricovic, 1998) e Topsis nel paragrafo 3.7 definito in (Yoon & Hwang, 1995) per ordinare gerarchicamente un insieme di intersezioni stradali in ambito urbano, con l'obiettivo di assegnare una priorità di intervento alle intersezioni, risultate critiche

in funzione del livello di incidentalità stradale pregresso e del rischio potenziale che tali eventi possano ripetersi in futuro, derivato dalle caratteristiche dei nodi.

L'analisi degli algoritmi di calcolo e la loro successiva applicazione come strumenti di supporto ai processi decisionali nella programmazione degli interventi sulle reti di trasporto, ha fatto emergere delle criticità che si sono volute superare con la proposta di una nuova metodologia di analisi presentata in questo paragrafo.

Il metodo dell'Analisi Concordante, come si è visto, è finalizzato ad individuare un sottoinsieme di alternative di miglior compromesso a partire da un insieme decisionale costituito da alternative equiprobabili. Tra le alternative dell'insieme di scelta, viene individuato il sottoinsieme in grado di raggiungere il miglior compromesso nel raggiungere le molteplici e contrastanti funzioni obiettivo. Il limite principale di questo metodo consiste nella possibilità che il sottoinsieme di miglior compromesso possa coincidere con l'insieme vuoto, condizione che si verifica quando per nessuna alternativa si determina un indice di dominanza della concordanza non negativo o un indice di dominanza della discordanza non positivo. In questo caso nessuna alternativa risulta capace di realizzare il compromesso migliore nel raggiungere i diversi obiettivi, pertanto il modello non è in grado di supportare la scelta del decisore nei confronti della alternativa o delle alternative di miglior compromesso.

Nel corso dello svolgimento del presente lavoro di ricerca, questo algoritmo è stato modificato per poterlo rendere funzionale alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione. Queste modifiche sono state presentate nei paragrafi 3.3 e 3.4. Nel paragrafo 3.3 è stato introdotto un passaggio iterativo nell'algoritmo di calcolo che, ad ogni iterazione, estrae dall'insieme di scelta il sottoinsieme di alternative risultate di miglior compromesso in quell'iterazione. Prendendo le alternative nell'ordine con cui vengono estratte, viene costruita la gerarchia di miglior compromesso. Nel paragrafo 3.4 l'algoritmo è stato modificato per costruire un elenco gerarchico delle alternative del sottoinsieme di scelta, dalla prima posizione occupata dall'alternativa che soddisfa meglio gli obiettivi all'ultima posizione occupata da quella che li soddisfa peggio, secondo valori crescenti della differenza tra indice di dominanza della concordanza e indice di dominanza della discordanza. Entrambe le modifiche estendono la funzionalità del metodo, dalla risoluzione di problematiche di scelta alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione, ma non eliminano la criticità del metodo, cioè che il

sottoinsieme di scelta possa coincidere con l'insieme vuoto con conseguente restituzione di una gerarchia di alternative vuota o incompleta.

Il metodo Electre III è un metodo funzionale alla risoluzione di problematiche di gerarchizzazione e rappresenta in forma semplificata l'attività decisionale di un soggetto che esprime, sulla base degli effetti di ciascuna coppia di alternative, non solo una preferenza netta di una alternativa rispetto ad un'altra, ma anche una preferenza debole o una situazione di incomparabilità. La criticità principale riscontrata nel metodo consiste nel fatto che per specificare queste condizioni di preferenza forte, debole e di incomparabilità tra due alternative, introduce dei valori soglia derivati dalle preferenze del soggetto decisionale. Per ogni funzione obiettivo il valutatore deve specificare tre valori soglia di preferenza e il valore del peso relativo. La molteplicità di queste soglie aumenta la difficoltà che incontra il valutatore nell'interpretare le preferenze del soggetto decisionale e aumenta la difficoltà del soggetto decisionale di esprimere in modo chiaro le differenze le soglie e il peso di ciascuna funzione obiettivo.

Il metodo Topsis assegna a ciascuna alternativa, una posizione all'interno della gerarchia di miglior compromesso, sulla base della distanza tra gli effetti di questa e quelli delle alternative ideali, positiva e negativa, per ciascun criterio. Questo metodo restituisce una gerarchia completa delle alternative dell'insieme di confronto e risulta semplice dal punto di vista computazionale ma basa la valutazione della preferibilità delle alternative espressa dal soggetto decisionale, sulla distanza euclidea tra gli effetti delle alternative per ciascun criterio, che non considera la variazione della preferenza del decisore nella scelta di un'alternativa rispetto ad un'altra, al variare della differenza tra gli effetti delle due alternative.

Anche il metodo VIKOR produce una gerarchia di miglior compromesso ma questa, in funzione del verificarsi delle condizioni espresse nell'equazione (3.6.4) nel paragrafo 3.6, può risultare parziale, escludendo dalla gerarchia di miglior compromesso una o più alternative appartenenti all'insieme decisionale.

Il nuovo metodo di analisi multi-criteria proposto nel presente capitolo, è stato chiamato "Multi-criteria Trigonometric Approach" (MTA) perché è un metodo di analisi multi-criteria che utilizza una funzione trigonometrica per rappresentare il livello di soddisfazione percepito dal soggetto decisionale, quando all'interno di un processo decisionale sceglie un'alternativa piuttosto che un'altra. Sulla base del livello di soddisfazione complessivamente assegnato a ciascuna

alternativa, viene costruita una gerarchia completa, comprendente tutte le alternative dell'insieme decisionale, ordinata dall'alternativa con il più elevato livello di soddisfazione che raggiunge, meglio delle altre, i molteplici obiettivi prefissati, a quella con il livello di soddisfazione più basso, che soddisfa peggio i molteplici obiettivi. La valutazione viene effettuata tramite un confronto a coppie tra le alternative, sulla base della differenza tra le prestazioni che ciascuna coppia di alternative raggiunge in corrispondenza dell'insieme di preposto di criteri. Questo metodo si basa su un algoritmo caratterizzato dalla semplicità e dalla rapidità di calcolo ed introduce come elemento innovativo la dipendenza della soddisfazione che riceve il soggetto decisionale nella scelta di un'alternativa rispetto ad un'altra, non solo con la differenza tra gli effetti delle due alternative, ma anche con gli effetti massimi e minimi delle altre alternative dell'insieme decisionale.

Per poter inquadrare i risultati ottenuti utilizzando questo nuovo metodo multi-criteria, attraverso un'analisi svolta sulla base dei risultati prodotti da altre metodologie multi-criteria caratterizzate dall'uso consolidato nella letteratura scientifica e nel corso del presente lavoro di ricerca, sono state individuate quelle che potessero essere utilizzate in questa fase di confronto. Tra i differenti metodi sono stati scelti il metodo TOPSIS e il metodo Vikor perché, analogamente alla tecnica di analisi e ai risultati prodotti dal nuovo metodo proposto, entrambi i due metodi scelti per il confronto, costruiscono un ordine gerarchico di un insieme di alternative equiprobabili confrontando gli effetti misurati in accordo con un set definito di criteri di valutazione. La costruzione di una gerarchia di alternative sulla base degli effetti che le alternative ottengono nei confronti di un insieme di criteri di valutazione, rende i risultati confrontabili con quelli ottenuti dalla metodologia MTA. Sono stati elaborati numerosi test in cui i risultati delle tre metodologie sono stati messi a confronto, con lo scopo di verificare la coerenza dei risultati ottenuti con il nuovo metodo MTA con quelli ottenuti dagli altri due metodi considerati per il confronto. I test sono stati condotti su un campione di mille esempi numerici non corrispondenti a valori di reali funzioni obiettivo ma ottenuti attraverso una funzione di generazione casuale di ogni elemento della matrice decisionale. Pur non rappresentando valori di reali funzioni obiettivo rappresentano valori che realisticamente possono assumere gli effetti delle alternative per ciascuna funzione obiettivo.

Allo stato attuale non è ancora stata definita una modalità di assegnazione di un ordine di priorità ai criteri, per cui nel metodo attualmente presentato, tutti i criteri si considerano con lo

stesso ordine di importanza. Sono attualmente in corso sviluppi in questa direzione per implementare anche in questo metodo il riconoscimento di un sistema di pesatura.

5.2 SPECIFICAZIONE DELL'ALGORITMO

Sia dato un insieme di alternative $A=\{a_1, a_2, \dots, a_i\}$ con $i \in \mathbb{N}^+$ ed un insieme di criteri $C=\{c_1, c_2, \dots, c_j\}$ con $j \in \mathbb{N}^+$. Il primo passo dell'algoritmo consiste nel rappresentare la matrice A degli effetti, dove il singolo elemento a_{ij} rappresenta la prestazione di ciascuna alternativa a_i in corrispondenza di ciascun criterio c_j .

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,\dots} & a_{1,j} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,\dots} & a_{2,j} \\ a_{\dots,1} & a_{\dots,2} & a_{\dots,\dots} & a_{\dots,j} \\ a_{i,1} & a_{i,2} & a_{i,\dots} & a_{i,j} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Successivamente occorre determinare l'intervallo massimo di variazione degli effetti di tutte le alternative, per ciascun criterio c_j . Questo intervallo è dato dalla differenza tra il valore maggiore e quello minore delle prestazioni di tutte le alternative, determinata in corrispondenza di ciascun criterio c_j .

$$C = \begin{bmatrix} \max(a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,\dots}, a_{1,j}) - \min(a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,\dots}, a_{1,j}) \\ \max(a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,\dots}, a_{2,j}) - \min(a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,\dots}, a_{2,j}) \\ \max(a_{\dots,1}, a_{\dots,2}, a_{\dots,\dots}, a_{\dots,j}) - \min(a_{\dots,1}, a_{\dots,2}, a_{\dots,\dots}, a_{\dots,j}) \\ \max(a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,\dots}, a_{i,j}) - \min(a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,\dots}, a_{i,j}) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Il passo successivo consiste nel rendere confrontabili tra di loro i valori della matrice degli effetti. Questa rappresenta un'operazione di normalizzazione dei valori, dove per ciascun criterio c_j , la differenza tra il valore maggiore e quello minore delle prestazioni delle alternative è rapportata ad uno specifico campo di valori appartenente al dominio della seguente funzione:

$$f(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(x) \quad (5.3)$$

Questo specifico campo di valori è stato scelto come la distanza tra il punto in cui la funzione (5.3) assume valore nullo, in corrispondenza di $x = 0$, e quello in cui assume il valore corrispondente al 95% del valore del suo asintoto orizzontale. Per la funzione (5.3) la retta $x = 1$ è asintoto orizzontale e assume il valore pari a 0,95 in corrispondenza di $x = \tan(0,95 \cdot \pi/2)$. Questa operazione consente di rapportare la differenza tra gli effetti delle alternative a un

campo finito di valori numerici ed assume per la funzione (5.3) un valore limitato superiormente, utilizzato negli studi attualmente in corso, finalizzati ad implementare un sistema di pesi dei criteri nel metodo.

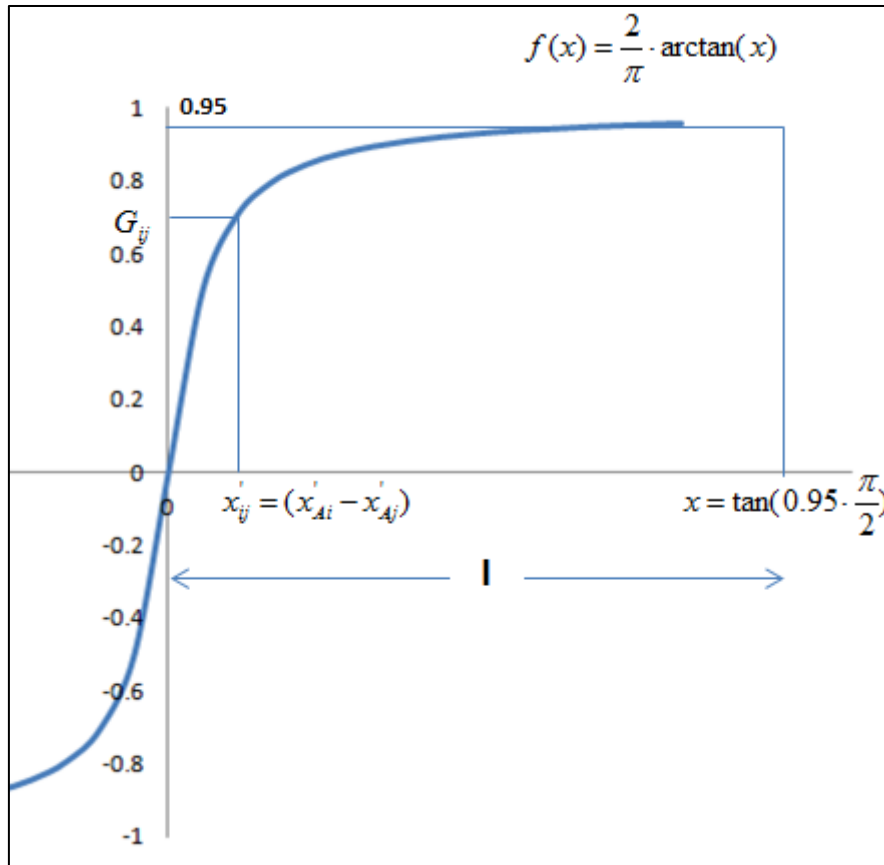


Figura 11 Funzione di preferenza del metodo MTA

Operativamente, per ciascun criterio c_j , la differenza tra le prestazioni di ciascuna coppia di alternative a_i e a_k viene rapportata a questo valore.

$$(x_{ik})_j = \frac{(a_{ij} - a_{kj})}{\max(a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,\dots}, a_{1,j}) - \min(a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,\dots}, a_{1,j})} \Bigg/ \tan\left(0,95 \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.4)$$

Il valore della funzione (5.3) nel punto $(x_{ik})_j$ rappresenta il livello di soddisfazione che riceve il soggetto decisionale quando sceglie, per un determinato criterio c_j , l'alternativa a_i al posto dell'alternativa a_k . Viene definito "indice gerarchico, G_i " il valore numerico che rappresenta il livello di soddisfazione che riceve il decisore quando sceglie l'alternativa a_i è chiamato. L'indice

gerarchico G_i è dato dalla somma dei valori della funzione (5.4), calcolati per ogni coppia di alternative a_i, a_k , con $i \neq k$ e per ogni criterio c_j , secondo la seguente espressione:

$$G_i = \sum \text{arccotan}(x_{ik})_j \quad (5.5)$$

Ordinando in ordine crescente i valori G_i delle diverse alternative, si ottiene la gerarchia di miglior compromesso, dall'alternativa che soddisfa meglio l'insieme dei criteri di valutazione, all'alternativa che li soddisfa meno.

5.3 UN ESEMPIO NUMERICO

Per presentare la funzionalità applicativa di questa nuova metodologia, viene proposto nel presente paragrafo un esempio numerico.

Sia data la matrice degli effetti seguente:

$$[A] = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 1 & 4 & 5 \\ 4 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Osservando la matrice (5.6) si nota che l'alternativa a_1 ha prestazioni inferiori alle altre due alternative per i criteri c_1 e c_2 e prestazioni superiori alle altre alternative per il criterio c_3 . L'alternativa a_2 ha prestazioni superiori all'alternativa a_1 e pari all'alternativa a_3 per il criterio c_1 , prestazioni superiori all'alternativa a_1 e inferiori all'alternativa a_3 per il criterio c_2 , prestazioni inferiori alle altre due alternative per il criterio c_3 . L'alternativa a_3 raggiunge prestazioni superiori all'alternativa a_1 e pari all'alternativa a_2 per il criterio c_1 , prestazioni superiori alle due alternative per il criterio c_2 , prestazioni inferiori all'alternativa a_1 ma superiori all'alternativa a_2 per il criterio c_3 .

Il primo passo dell'algoritmo consiste nel considerare l'intervallo massimo di variazione degli effetti di tutte le alternative, per ciascun criterio c_j . In questo esempio vengono considerati i criteri come benefici, cioè ai valori maggiori corrispondono gli effetti migliori e viceversa, ai valori minori corrispondono effetti peggiori.

$$[C] = \begin{bmatrix} \max(2,3,3) - \min(2,3,3) \\ \max(1,4,5) - \min(1,4,5) \\ \max(4,1,2) - \min(4,1,2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 - 2 \\ 5 - 1 \\ 4 - 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Per ogni coppia di alternative, si rapporta la differenza tra le delle loro prestazioni, all'intervallo massimo di variazione degli effetti di tutte le alternative e si moltiplica il valore per $x=\tan(0.95*\pi/2)$.

Per il criterio c_1 :

$$(x_{12})_1 = (2 - 3) / (3 - 2) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = -12,71 \quad (5.8)$$

$$(x_{21})_1 = -(x_{12})_1 = 12,71 \quad (5.9)$$

$$(x_{13})_1 = (2 - 3) / (3 - 2) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = -12,71 \quad (5.10)$$

$$(x_{31})_1 = -(x_{13})_1 = 12,71 \quad (5.11)$$

$$(x_{23})_1 = (3 - 3) / (3 - 2) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = 0 \quad (5.12)$$

$$(x_{32})_1 = -(x_{23})_1 = 0 \quad (5.13)$$

Per il criterio c_2 :

$$(x_{12})_2 = (1 - 4) / (5 - 1) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = -9,53 \quad (5.14)$$

$$(x_{21})_2 = -(x_{12})_2 = 9,53 \quad (5.15)$$

$$(x_{13})_2 = (1 - 5) / (5 - 1) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = -12,71 \quad (5.16)$$

$$(x_{31})_2 = -(x_{13})_2 = 12,71 \quad (5.17)$$

$$(x_{23})_2 = (4 - 5) / (5 - 1) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = -3,18 \quad (5.18)$$

$$(x_{32})_2 = -(x_{23})_2 = 3,18 \quad (5.19)$$

Per il criterio c_3 :

$$(x_{12})_3 = (1 - 4) / (4 - 1) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = 12,71 \quad (5.20)$$

$$(x_{21})_3 = -(x_{12})_2 = -12,71 \quad (5.21)$$

$$(x_{13})_3 = (1 - 5) / (4 - 1) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = 8,47 \quad (5.22)$$

$$(x_{31})_3 = -(x_{13})_2 = -8,47 \quad (5.23)$$

$$(x_{23})_3 = (4 - 5) / (4 - 1) \times \left(\tan \left(0,95 \frac{\pi}{2} \right) \right) = -4,24 \quad (5.24)$$

$$(x_{32})_3 = -(x_{23})_2 = 4,24 \quad (5.25)$$

Il passo successivo consiste nel calcolare la funzione (5.3) nei punti $x=x_{ij}$ determinati precedentemente.

Per il criterio c_1 :

$$f_{(12)_1} = 2/\pi \arctg(-12,71) = -0,95 \quad (5.26)$$

$$f_{(21)_1} = 2/\pi \arctg(12,71) = 0,95 \quad (5.27)$$

$$f_{(13)_1} = 2/\pi \arctg(-12,71) = -0,95 \quad (5.28)$$

$$f_{(31)_1} = 2/\pi \arctg(12,71) = 0,95 \quad (5.29)$$

$$f_{(23)_1} = 2/\pi \arctg(0) = 0 \quad (5.30)$$

$$f_{(32)_1} = 2/\pi \arctg(0) = 0 \quad (5.31)$$

Per il criterio c_2 :

$$f_{(12)_2} = 2/\pi \arctg(-9,53) = -0,93 \quad (5.32)$$

$$f_{(12)_2} = 2/\pi \arctg(9,53) = 0,93 \quad (5.33)$$

$$f_{(13)_2} = 2/\pi \arctg(-12,71) = -0,95 \quad (5.34)$$

$$f_{(31)_2} = 2/\pi \arctg(12,71) = 0,95 \quad (5.35)$$

$$f_{(23)_2} = 2/\pi \arctg(-3,18) = -0,81 \quad (5.36)$$

$$f_{(32)_2} = 2/\pi \arctg(3,18) = 0,81 \quad (5.37)$$

Per il criterio c_3 :

$$f_{(12)_3} = 2/\pi \arctg(12,71) = 0,95 \quad (5.38)$$

$$f_{(12)_3} = 2/\pi \arctg(-12,71) = -0,95 \quad (5.39)$$

$$f_{(13)_3} = 2/\pi \arctg(8,47) = 0,93 \quad (5.40)$$

$$f_{(31)_3} = 2/\pi \arctg(-8,47) = -0,93 \quad (5.41)$$

$$f_{(23)_3} = 2/\pi \arctg(-4,24) = -0,85 \quad (5.42)$$

$$f_{(32)_3} = 2/\pi \arctg(4,24) = 0,85 \quad (5.43)$$

Il passo successivo consiste nel determinare l'indice di gerarchia M_i , calcolato per ogni alternativa a_i , secondo le seguenti espressioni, con la condizione:

$$i \neq j \quad (5.44)$$

$$M_1 = \sum_{i,j=1}^3 f_{(1i)_j} = -1,91 \quad (5.45)$$

$$M_2 = \sum_{i,j=1}^3 f_{(2i)_j} = -0,72 \quad (5.46)$$

$$M_3 = \sum_{i,j=1}^3 f_{(3i)_j} = 2,63 \quad (5.47)$$

In tal modo viene definita la gerarchia di miglior compromesso, ordinata dall'alternativa in grado di soddisfare meglio le funzioni obiettivo a quella capace di soddisfarle peggio, secondo valori decrescenti dell'indice di gerarchia M_i . La prima posizione nella gerarchia sarà occupata dall'alternativa a_i con il valore maggiore di M_i . Nel caso in esame, la gerarchia sarà costituita in prima posizione dall'alternativa a_3 , cui corrisponde un indice di gerarchia M_3 pari a 2,63, in seconda posizione dall'alternativa a_2 ($M_2=-0,72$), in terza e ultima posizione dall'alternativa a_1 ($M_1=-1,91$).

5.4 CONFRONTO

La gerarchia di miglior compromesso ottenuta con il nuovo metodo MTA nell'esempio del paragrafo precedente, è stata confrontata con le gerarchie ottenute utilizzando i metodi TOPSIS e VIKOR. Il confronto è avvenuto sulla base della stessa matrice degli effetti, elemento che ha permesso di effettuare il confronto dello stesso insieme di alternative, sulla base delle medesime

funzioni obiettivo e considerando gli stessi valori degli effetti. E' stata pertanto utilizzata la stessa matrice degli effetti dell'esempio numerico precedente:

$$[A] = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 1 & 4 & 5 \\ 4 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

Utilizzando il metodo TOPSIS sono state ricavate le distanze S_i^* di ciascuna alternativa a_i rispetto all'alternativa ideale positiva, le distanze S_i^- di ciascuna alternativa a_i rispetto all'alternativa ideale negativa e la distanza relativa $S_i^-/(S_i^* + S_i^-)$. I risultati sono espressi nella tabella seguente.

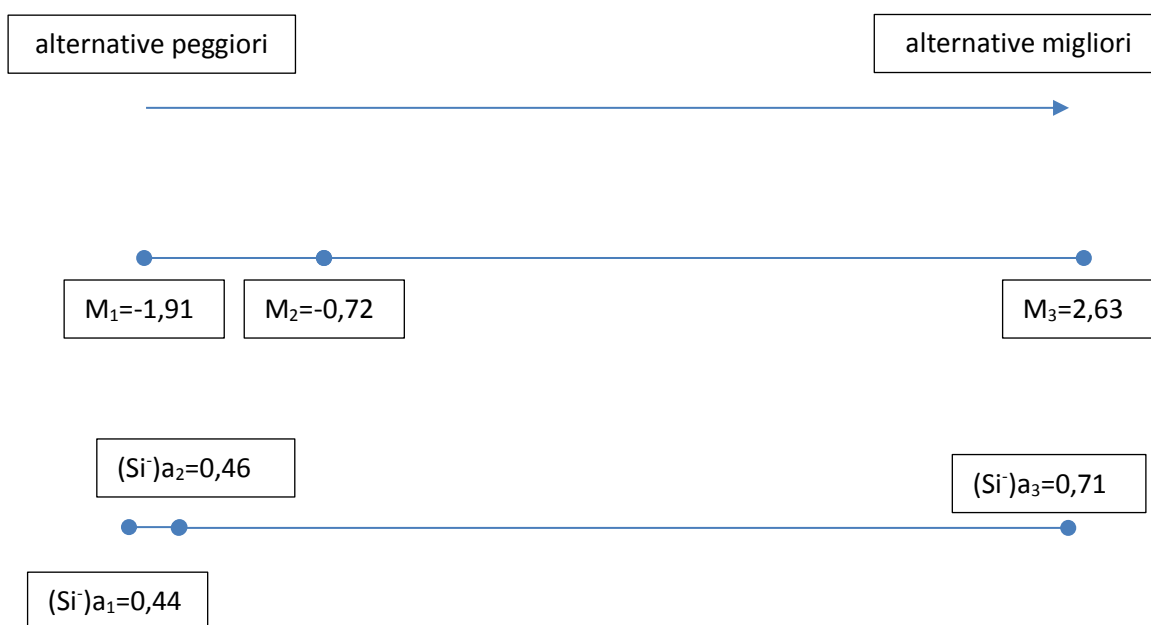
	a_1	a_2	a_3
S_i^*	0,83	0,81	0,44
S_i^-	0,65	0,68	1,05
$S_i^-/(S_i^* + S_i^-)$	0,44	0,46	0,71

Ordinando i valori delle distanze relative $S_i^-/(S_i^* + S_i^-)$ da quello maggiore a quello minore, si ottiene la gerarchia di alternative, ordinata da quella che soddisfa meglio gli obiettivi a quella che li soddisfa peggio.

Gerarchia	$S_i^-/(S_i^* + S_i^-)$	Alternativa
I	0.71	a_3
II	0.46	a_2
III	0.44	a_1

La gerarchia di miglior compromesso ottenuta con il metodo TOPSIS coincide con quella fornita dal metodo MTA, che vede la prima posizione assegnata all'alternativa a_3 , la seconda posizione assegnata all'alternativa a_2 e la terza posizione assegnata all'alternativa a_1 . Pur mantenendo lo stesso ordine gerarchico del metodo MTA, il metodo TOPSIS determina una differente capacità delle alternative di soddisfare il sistema degli obiettivi. Si nota che nel metodo TOPSIS la distanza tra le alternative a_1 e a_2 dall'alternativa ideale positiva è pressochè la stessa, questa distanza è pari circa al doppio (+84%) di quella tra l'alternativa a_3 (al primo posto nella gerarchia di miglior compromesso) e l'alternativa ideale positiva. Una situazione analoga si verifica considerando la distanza rispetto all'alternativa ideale negativa, le alternative a_1 e a_2 registrano entrambe una

distanza dall'alternativa ideale negativa inferiore di circa il 55% rispetto a quella registrata tra l'alternativa a_3 e l'alternativa ideale negativa. Nel metodo MTA, la differenza in valore assoluto tra l'indice di gerarchia dell'alternativa a_1 in terza posizione ($M_1=-1,91$) e l'indice di gerarchia dell'alternativa a_2 in seconda posizione ($M_2=-0,72$) è pari a $d_1=1.19$. Invece la differenza in valore assoluto tra l'indice di gerarchia dell'alternativa a_2 e l'indice di gerarchia dell'alternativa a_3 in prima posizione ($M_3=2,63$) è pari a $d_2=3.35$. Per cui l'alternativa a_2 si pone tra la a_3 e la a_1 , a maggiore distanza dall'alternativa a_3 rispetto all'alternativa a_1 , diversamente dal metodo TOPSIS dove le alternative a_2 e a_1 vengono percepite come simili dal punto di vista del raggiungimento degli obiettivi.



Utilizzando il metodo VIKOR sono stati ricavati i parametri S_i , R_i , Q_i , per ciascuna alternativa a_i . I risultati sono espressi nella tabella seguente

	a_1	a_2	a_3
S_i	2	1,25	0,67
R_i	1	1	0,67
Q_i	1	0,72	0

Sulla base dei valori assunti dai parametri S_i , R_i , Q_i , è possibile costruire la gerarchia di alternative, da quella che soddisfa meglio gli obiettivi a quella che li soddisfa peggio.

Gerarchia	S_i	R_i	Q_i
I	a_3	a_3	a_3
II	a_2	a_2, a_1	a_2
III	a_1		a_1

L'algoritmo del metodo VIKOR identifica come unica alternativa appartenente alla gerarchia di miglior compromesso, l'alternativa a_3 , senza fornire informazioni sulle altre due alternative, a_2 e a_1 , appartenenti all'insieme di scelta.

Gerarchia	
1	a_3

I metodi MTA, Vikor e Topsis sono quindi coerenti nell'individuare al primo posto della gerarchia di miglior compromesso, la stessa alternativa a_3 . Mentre la gerarchia di miglior compromesso proposta dal metodo VIKOR è limitata all'alternativa a_3 , perché l'algoritmo del metodo non fornisce informazioni sulle altre due alternative, i metodi MTA e Topsis propongono la stessa gerarchia completa, che vede l'alternativa a_2 in seconda posizione e l'alternativa a_1 in terza posizione.

Per verificare il livello di congruenza dei risultati espressi con il metodo MTA, rispetto a quelli ottenuti con i metodi VIKOR e TOPSIS, estendendo la verifica ad un numero elevato di casistiche, rispetto a quelle che si potrebbero riscontrare lavorando su un numero limitato di casi pratici, sono stati condotti test di sensitività su molteplici esempi numerici casuali. E' stata presa in considerazione una matrice degli effetti di dimensione 3x3 e sono stati condotti test di confronto su un campione di mille esempi numerici. In ciascuno dei test è stato fatto variare il valore di ciascun elemento a_{ij} della matrice attraverso una funzione di generazione casuale di valori, secondo numeri casuali positivi interi compresi tra 1 e 1000.

Questa operazione di confronto tra i risultati ottenuti dai tre metodi di analisi, ha prodotto le risultanze rappresentate nelle tabelle seguenti. In 790 test sul totale dei 1000 condotti (79%), tutti i tre metodi hanno restituito come prima alternativa nella gerarchia di miglior compromesso, la stessa alternativa. In 190 test (19%) i tre metodi hanno restituito la stessa alternativa in seconda posizione e in 2 test (2%) la stessa alternativa in terza posizione. La

congruenza dei tre metodi nell'individuare la stessa miglior alternativa, cioè quella in prima posizione, risulta elevata. La percentuale invece scende in misura rilevante quando si analizzano le posizioni gerarchiche successive.

CONFRONTO MTA – TOPSIS – VIKOR	
I	79%
II	19%
III	2%

Per analizzare con maggiore dettaglio la causa di questo risultato è stato eseguito un confronto del metodo MTA separatamente prima con il metodo Topsis e successivamente con il metodo VIKOR. Effettuando questo confrontando, si registra un livello di congruenza maggiore del metodo MTA con il metodo TOPSIS rispetto a quanto si registra con il metodo VIKOR. Nel confronto tra MTA e TOPSIS i due metodi individuano la stessa alternativa in la posizione nell'83% dei test, in IIa posizione nel 70% e in IIIa posizione nell'83%.

CONFRONTO MTA-TOPSIS	
I	83%
II	70%
III	83%

Estendendo il confronto alla possibilità che i due metodi restituiscano le stesse due alternative in Ia e IIa posizione, condizione maggiormente restrittiva della precedente perché richiede un livello di coerenza superiore, il metodo TOPSIS E MTA forniscono le stesse alternative nelle prime due posizioni, nel 69% dei test. Questa percentuale viene mantenuta costante quando si opera un ulteriore passaggio verificando il numero di casistiche nei quali i due metodi restituiscono le stesse tre alternative in Ia, IIa e IIIa posizione, cioè restituiscano una gerarchia di miglior compromesso perfettamente coincidente.

CONFRONTO MTA-TOPSIS	
I e II	69%
I e II e III	69%

Effettuando lo stesso confronto con i metodi MTA e VIKOR, si verifica che entrambi i due metodi determinano la stessa alternativa in la posizione nel 79% dei test, in IIa posizione nel 19% e in IIIa nel 2%.

CONFRONTO MTA-VIKOR	
I	79%
II	19%
III	2%

Estendendo il confronto alla possibilità che i due metodi restituiscano le stesse alternative nelle prime due posizioni, i metodi VIKOR E MTA individuano la stessa gerarchia nel 19% dei test. Quando il confronto si estende alla possibilità che i due metodi restituiscano le stesse alternative nelle prime tre posizioni, cioè restituiscano la stessa gerarchia completa, la percentuale scende all'1%.

CONFRONTO MTA-VIKOR	
I e II	19%
I e II e III	1%

Dai test eseguiti si evince che nel confronto tra MTA e TOPSIS c'è un elevato grado di congruenza in quanto nell'83% del test viene restituita la stessa prima scelta e l'intera gerarchia di miglior compromesso ha una corrispondenza totale nel 69% dei test. Con il Vikor il livello di congruenza si abbassa facendo coincidere la stessa alternativa come prima scelta nel 79% dei test ma restituendo la stessa gerarchia completa solo nell'1% dei test, a causa della formulazione dell'algoritmo del metodo VIKOR che restituisce, in funzione della condizione espressa dall'espressione (3.6.4) anche gerarchie incomplete. Pertanto l'incongruenza maggiore delle gerarchie di miglior compromesso, che si registra nel confronto tra i metodi MTA e VIKOR, non

è dovuta soltanto al posizionamento diverso delle alternative nella gerarchia ma al fatto che nel metodo VIKOR non tutte le alternative possono essere posizionate nella gerarchia.

5.5 CONCLUSIONI

In questo capitolo è stato presentato un nuovo metodo di analisi multi-criteria, MTA, finalizzato alla risoluzione di problematiche decisionali di gerarchizzazione. Dato un insieme di alternative di scelta, il metodo supporta l'azione di un soggetto decisionale che si pone l'obiettivo di gerarchizzare un insieme finito di alternative sulla base di criteri di scelta. La specificazione del metodo muove i primi passi a partire dalle criticità emerse utilizzando i metodi dal consolidato uso nella letteratura scientifica nei casi applicativi riportati nel presente lavoro di ricerca.

Questo metodo presenta differenti vantaggi che riguardano sia la sfera applicativa che quella relativa alla rappresentazione della preferenza che un soggetto decisionale attribuisce ad una alternativa rispetto ad un'altra, in funzione degli effetti che queste assumono in corrispondenza dei criteri di valutazione. Il metodo MTA risulta capace di differenziare il livello di preferenza in funzione dell'entità del margine con cui le prestazioni di una alternativa superano quelle di un'altra, margine definito anche in funzione del campo massimo di variazione degli effetti raggiunti anche dalle altre alternative. Per cui la valutazione avviene non soltanto sulla base del confronto considerando in maniera isolata ciascuna coppia di alternative, ma sulla base dell'intero campo di variazione degli effetti di tutte le alternative.

I risultati ottenuti da questo metodo sono stati verificati anche in relazione a quanto ottenuto tramite altri metodi di analisi multi-criteria dall'utilizzo consolidato nella letteratura scientifica, che in modo analogo si propongono di costruire gerarchie di alternative sulla base di analisi a criteri multipli. Per non limitare questo confronto a pochi casi pratici isolati, sono stati sviluppati 1000 test in cui i valori della matrice degli effetti sono stati variare secondo sequenze numeriche casuali. Questo ha portato a definire delle gerarchie di miglior compromesso per ciascun metodo e ad effettuare analisi di confronto per valutare in che misura i risultati prodotti dal metodo MTA possono essere congruenti con quelli prodotti dai metodi di confronto, nello specifico i metodi VIKOR e Topsis.

Il metodo presentato definisce una gerarchia di miglior compromesso sulla base di un insieme di criteri di valutazione di uguale importanza, cioè non viene implementata la possibilità di attribuire una importanza specifica ai diversi criteri, in funzione delle preferenze espresse dal

soggetto decisionale. Questo elemento è un forte limite all'applicabilità del modello a supporto delle azioni di Piano, tema centrale del presente lavoro, ma viene qui presentata la struttura di base che in lavori successivi verrà sviluppata anche secondo questo importante aspetto.

CONCLUSIONI

Questo lavoro rappresenta la sintesi dell'attività di ricerca svolta durante il percorso dottorale, nell'ambito dei sistemi di supporto alle decisioni, applicati al settore specifico dei sistemi di trasporto stradali.

L'obiettivo del lavoro è stato quello di condurre uno studio dello stato dell'arte sulle metodologie di analisi multi-criteria dall'utilizzo consolidato nella letteratura scientifica e, attraverso la specificazione della struttura di un sistema di supporto alle decisioni, utilizzare i metodi per affrontare una serie di casi applicativi rappresentati da casi studio reali. Pertanto l'attività svolta ha interessato sia una fase di ricerca prettamente scientifica, orientata ad inquadrare la tematica della valutazione e ad analizzare la struttura e gli algoritmi delle metodologie di analisi a criteri multipli analizzate, sia una fase applicativa condotta con la finalità di fornire un supporto, attraverso le metodologie di analisi multi-criteria, all'azione decisionale nel campo dei trasporti.

Nel corso del lavoro sono state affrontate differenti problematiche, non esaustive di tutti gli aspetti che possono interessare le attività decisionali nel campo dei trasporti ma rappresentative di differenti aspetti significativi. Il primo caso studio, analizzato nel capitolo 4.2 "Un modello innovativo per la valutazione delle reti stradali urbane mediante indicatori sintetici di prestazione", affronta la valutazione delle prestazioni globali di una rete di trasporto in ambito urbano secondo differenti ambiti operativi. L'azione decisionale, supportata dal metodo dell'Analisi Concordante, ha consentito di individuare lo scenario di miglior compromesso scelto

tra un insieme di possibili opzioni. Nel capitolo 4.3 “Un sistema di supporto alle decisioni basato sull’analisi concordante per le analisi sulla sicurezza stradale” lo stesso metodo dell’analisi Concordante è stato utilizzato per supportare l’azione decisionale ed individuare, tra i tronchi stradali omogenei di un’arteria stradale, quelli caratterizzati dalle condizioni di sicurezza maggiormente critiche, attraverso una gerarchizzazione costruita in funzione delle condizioni di sicurezza. Nel capitolo 4.4 “Un sistema di supporto alle decisioni basato sul metodo Electre III per le analisi di sicurezza stradale” l’azione decisionale focalizzata sulla valutazione delle condizioni di sicurezza degli elementi della rete, viene supportata utilizzando il metodo di analisi Electre III che introduce, nella rappresentazione del processo decisionale, non solo la preferenza di una alternativa rispetto ad un’altra per il raggiungimento degli obiettivi preposti, ma anche una preferenza debole o una situazione di incomparabilità. Nel capitolo 4.5 “Gerarchizzazione di intersezioni in una rete stradale urbana” sono stati utilizzati tre metodi di analisi multi-criteria, Analisi Concordante, Vikor e Topsis, per costruire una gerarchia di intersezioni stradali in funzione delle condizioni di sicurezza. Il supporto offerto da ciascuna metodologia ha consentito di raggiungere l’obiettivo e risultati ottenuti sono stati confrontati per individuare differenze e analogie tra le gerarchie costruite da ciascun metodo.

La rappresentazione teorica del processo valutativo, tradotta negli algoritmi di calcolo dei modelli, non si è sempre rivelata di adeguata fattibilità pratica durante l’applicazione ai casi studio. Questo ha portato a proporre alcune modifiche agli algoritmi utilizzati. La scelta dei modelli di rappresentazione delle preferenze, così come quella dei criteri di valutazione, è andata incontro a questa necessità ricercando sempre, nella scelta del metodo di rappresentazione del processo decisionale e in quella dell’insieme degli indicatori alla base del modello, la semplicità di calcolo e di utilizzo pratico.

Per superare le criticità evidenziate dall’utilizzo di metodi di analisi a criteri multipli dall’uso consolidato nella letteratura scientifica, è stato proposto un innovativo metodo di analisi a criteri multipli, MTA (Multi-criteria Trigonometric Approach, che propone di rappresentare, attraverso una funzione trigonometrica, la funzione di preferenza delle alternative appartenenti ad un insieme decisionale, per arrivare a costruire una gerarchia sulla base di un sistema di obiettivi. Questo non rappresenta un passo conclusivo per l’implementazione del metodo all’interno di un sistema di supporto alle decisioni mediante tecniche di analisi multi-criteria, come visto con gli altri metodi, ma sono richiesti ulteriori sviluppi, incentrati in particolare sullo studio della

forma della funzione di preferenza oltre che finalizzati ad implementare un sistema di pesi che deve essere assegnato ai criteri per differenziarne la priorità.

Bibliografia

- Bao, Q., Ruan, D., Shen, Y., Hermans, E., & Janssens, D. (2012). Improved hierarchical fuzzy TOPSIS for road safety performance evaluation. *Knowledge-based systems*, 32, 84-90.
- Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of complex systems* (Vol. 213). Massachusetts: Addison-Wesley.
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer US.
- Bernardi, L., & Ongaro Bertol, F. (1984). *Azione sociale e valutazione*. Roma: Ufficio studi, ricerche, documentazione e legislazione della direzione generale dei servizi civili del Ministero dell'Interno.
- Bertin, G. M. (1995). *Valutazione e sapere sociologico. Metodi e tecniche di gestione dei processi decisionali*. Franco Angeli.
- Bezzi, C. (2003). *Il Disegno della Ricerca Valutativa*. Milano: Franco Angeli.
- Bulgarelli, A. (1997). *L'integrazione fra sistemi di formazione e istruzione nel primo triennio di gestione del Fondo Sociale Europeo*. Roma: Isfol Struttura di Valutazione del Fse.
- Casti, J. L. (1994). *Complexification explaining a paradoxical world through the science of surprise*. Harpercollins.
- Chen, S.-J., Hwang, C.-L., & Hwang, F. P. (1992). *Fuzzy multiple attribute decision making (methods and applications)*. Berlin: Springer.
- Coll, B., Moutari, S., & Marshall, A. H. (2013). Hotspots identification and ranking for road safety improvement: An alternative approach. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 604-617.
- Colonna, P. (2002). Proposal for a safety function for evaluating the road efficiency level. *The third international conference on traffic and transportation*. Guilin, Cina.
- Comission European. (1999). *Evaluating socio-economic programmes : MEANS collection* (Vol. 6). Luxembourg: Official Publ. of the Europ. Communities.
- Dell'Acqua, G., De Luca, M., & Mauro, R. (2011). Road safety knowledge-based decision support system. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 20, 973-983.
- Deng, H., Yeh, C.-H., & Willis, R. J. (2000). Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights. *Computers & Operations Research*, 27(10), 963-973.

- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763-770.
- Duckstein, L., & Opricovic, S. (1980). Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resources Research*, 16(1), 14-20.
- Elghali, L., Clift, R., & Begg, K. G. (2008). Decision support methodology for complex contexts. *Engineering sustainability*, 161(1), 7-22.
- Elvik, R., Høy, A., Vaa, T., & Sørensen, M. (2009). *The handbook of road safety measures*. Emerald Group Publishing.
- Fadda, P. (2002). *Concezione dei progetti di trasporto in ambiente sistemico*. Rubbettino Editore.
- Faggioni, F., & Simone, C. (2011). Le declinazioni della complessità. Ordine, caos e sistemi complessi. *Sinergie Italian Journal of Management*, 79, 3-45.
- Fancello, G., Carta, M., & Fadda, P. (2014). A decision support system based on Electre III for safety analysis in a suburban road network. *Transportation Research Procedia*, 3, 175-184.
- Fancello, G., Carta, M., & Fadda, P. (2014). A modeling tool for measuring the performance of urban road networks. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 559-566.
- Fancello, G., Carta, M., & Fadda, P. (2015). A decision support system for road safety analysis. *Transportation Research Procedia*, 5, 201-210.
- Fancello, G., Carta, M., Uccheddu, B., & Fadda, P. (2013). Gli indicatori di prestazione di una rete stradale urbana: uno stato dell'arte. In *Linee guida per l'analisi e il progetto di reti urbane di trasporto. Metodologie: Stato dell'arte e modelli*.
- Fancello, G., Carta, M., Uccheddu, B., & Fadda, P. (2013). Un modello innovativo per la valutazione delle reti stradali urbane mediante indicatori sintetici di prestazione. In *Linee guida per l'analisi e il progetto di reti urbane di trasporto. Metodologie: Stato dell'arte e modelli*.
- Fierek, S., & Zak, J. (2012). Planning of an integrated urban transportation system based on macro-simulation and MCDM/A methods. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 567-579.
- Figueira, J., Mousseau, V., & Roy, B. (2005). *ELECTRE methods*. In: *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. New York: Springer.

- Fusco, G. L., Nijkamp, P., & Voogd, H. (1989). *Conservazione e sviluppo: la valutazione nella pianificazione fisica*. Milano: Franco Angeli.
- Gardziejczyk, W., & Zabicki, P. (2014). The influence of the scenario and assessment method on the choice of road alignment variants. *Transport Policy*, 36, 294-305.
- Giuliano, G. (1985). A multicriteria method for transportation investment planning. *Transportation Research Part A: General*, 19(1), 29-41.
- Greibe, P. (2003). Accident prediction models for urban roads. *Accident Analysis & Prevention*, 35(2), 273-285.
- Haghshenas, H., & Vaziri, M. (2012). Urban sustainable transportation indicators for global comparison. *Ecological Indicators*, 15, 115-121.
- Herbert, S. A. (1960). *The new science of management decision*. New York: Harper.
- Hermans, E., Van Den Bossche, F., & Wets, G. (2008). Combining road safety information in a performance index. *Accident Analysis & Prevention*, 40(4), 1337-1344.
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*. Berlin: Springer.
- Ismail, M. A., Sadiq, R., Soleymani, H. H., & Tesfamariam, S. (2011). Developing a road performance index using a Bayesian belief network model. *Journal of the Franklin Institute*, 348(9), 2539-2555.
- ISTAT. (2016). *Incidenti stradali con lesioni alle persone*. Tratto da <http://dati.istat.it/>
- Jahan, A., & Edwards, K. L. (2013). VIKOR method for material selection problems with interval numbers and target-based criteria. *Materials & Design*, 47, 759-765.
- Janssen. (1991). Indicators for traffic safety: a new yardstick for safety." In: Proceedings of the Second International Conference on New Ways for Improved Road Safety and Quality of Life., (p. 117-126). Tel-Aviv, Israel.
- Kang, D., & Park, Y. (2014). Review-based measurement of customer satisfaction in mobile service: Sentiment analysis and VIKOR approach. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1041-1050.
- Karlaftis, M. G., & Golias, I. (2002). Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accident rates. *Accident Analysis & Prevention*, 34(3), 357-365.
- Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67.

- Lapucci, A. (2010). PhD Thesis. *Sistemi di supporto alle decisioni multicriteri spaziali per la valutazione territoriale integrata: sperimentazioni sul rischio incendi e sulla localizzazione di attività indesiderate.*
- Las Casas, G. B. (1996). *Una procedura di valutazione a due stadi: la localizzazione dell'Auditorium a Roma.* Oggetti di Studio LAC (Laboratorio per le Applicazioni di Calcolo), Università di Roma, Facoltà di Architettura.
- Las Casas, G. B. (1997). *I P.R.U.: la valutazione delle sinergie tra azioni elementari di trasformazione. Il caso dell'area urbana di Melfi.* Rivista del Dipartimento di Architettura, Pianificazione ed Infrastrutture di Trasporto, Università degli Studi della Basilicata, Facoltà di Ingegneria, DAPIT Ricerche.
- Le Moigne, J.-L. (1985). *Progettazione della complessità e complessità della progettazione* (Vol. La sfida della complessità). (G. Bocchi, & M. Ceruti, A cura di) Milano: Feltrinelli.
- Levin, S. (2003). Complex Adaptive Systems: Exploring the Known, Unknown and the. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 40(1), 3-19.
- Lombardo, S. (1995). *La valutazione del processo di piano. Contributi alla teoria e al metodo.* Franco Angeli.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis.* John Wiley & Sons.
- Martin, J.-L. (2002). Relationship between crash rate and hourly traffic flow on interurban motorways. *Accident Analysis & Prevention*, 34(5), 619-629.
- Meyer, P., & Roubens, M. (2005). Choice, ranking and sorting in fuzzy multiple criteria decision aid. In *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (p. 471-503). New York: Springer.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2012). *Studio di valutazione dei Costi Sociali dell'incidentalità Stradale.*
- Moghassem, A. (2013). Comparison among two analytical methods of multi-criteria decision making for appropriate spinning condition selection. *World Applied Sciences Journal*, 21(5), 784-794.
- Mohanty, P. P., & Mahapatra, S. S. (2014). A Compromise Solution by VIKOR Method for Ergonomically Designed Product with Optimal Set of Design Characteristics. *Procedia Materials Science*, 6, 633-640.
- Nijkamp, P., & Van Delft, A. (1977). *Multi-criteria analysis and regional decision-making* (Vol. 8). Springer Science & Business Media.

- OECD. (2013). *Towards a European road safety area: policy orientations on road safety 2011-2020*. Bruxelles: European Commission.
- Olteanu, A. L., Bisdorff, R., & Meyer, P. (2011). A contribution to the multiple criteria preordering problematique. *74th Meeting of the European Working Group Multiple Criteria Decision Aiding, 06-08 october 2011*. Yverdon-Les-Bains , Switzerland.
- Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems*. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade.
- Ortúzar, J. d., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport*. Wiley-Blackwell.
- Ostanello Borreani, A. M. (1983). *Elementi di analisi multicriteri e teoria di aiuto alla decisione*. Libreria editrice universitaria Levrotto & Bella.
- Ottino, J. M. (2003). Complex systems. *AIChE Journal*, 49(2), 292-299.
- Palumbo, M. (2002). *Il processo di valutazione. Decidere, programmare, valutare* (Vol. 3). FrancoAngeli.
- Papadopoulos, A., & Karagiannidis, A. (2008). Application of the multi-criteria analysis method Electre III for the optimisation of decentralised energy systems. *Omega*, 36(5), 766-776.
- Rogers, M., & Bruen, M. (1998). Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. *European Journal of Operational Research*, 107(3), 542-551.
- Roy, B. (1978). Un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahiers du CERO*, 20(1), 3-24.
- Roy, B. (1979). *De quelle décision s'agit-il, qui aider et comment?* Document du LAMSADE n.4, Université de Paris Dauphine, Paris.
- Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d' aide à la décision*. Paris: Editions Economica.
- Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). *Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas*. Paris: Economica.
- Roy, B., Present, M., & Silhol, D. (1986). A programming method for determining which Paris metro stations should be renovated. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 318-334.
- Russo, F., & Rindone, C. (2007). *Dalla pianificazione alla progettazione dei sistemi di trasporto: processi e prodotti*. Milano: Franco Angeli.

- Saaty, T. L. (1995). Transport planning with multiple criteria: the analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of advanced transportation*, 29(1), 81-126.
- Salminen, P., Hokkanen, J., & Lahdelma, R. (1998). Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. *European Journal of Operational Research*, 104(3), 485-496.
- Sarrazin, R., & De Smet, Y. (2011). A preliminary study about the application of multicriteria decision aid to the evaluation of the road projects' performance on sustainable safety. *Industrial Engineering and Engineering Management*, 727-732.
- Sarrazin, R., & De Smet, Y. (2015). Applying multicriteria decision analysis to design safe road projects. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 15(4), 613-634.
- Sarrazin, R., & De Smet, Y. (2016). Design safer and greener road projects by using a multi-objective evolutionary approach. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 6(1), 14-34.
- Scharlig, A. (1996). *Pratiquer Electre et Prométhée: un complément à décider sur plusieurs critères*. PPUR presses polytechniques.
- Stame, N. (1998). *L'esperienza della valutazione*. Seam.
- Transportation Research Board. (2010). *MANUAL-HCM, Highway Capacity*. National Research.
- Voogd, H. (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Taylor & Francis.
- Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management science*, 26(7), 641-658.
- Wong, S. C., Sze, N.-N., & Li, Y.-C. (2007). Contributory factors to traffic crashes at signalized intersections in Hong Kong. *Accident Analysis & Prevention*, 39(6), 1107-1113.
- Wu, H.-Y., Lin, Y.-K., & Chang, C.-H. (2011). Performance evaluation of extension education centers in universities based on the balanced scorecard. *Evaluation and Program Planning*, 34(1), 37-50.
- Yoon, P. K., & Hwang, C.-L. (1995). *Multiple attribute decision making: an introduction* (Vol. 104).
- Yu, P.-L. (1973). A class of solutions for group decision problems. *Management Science*, 19(8), 936-946.
- Zak, J., & Kruszynski, M. (2015). Application of AHP and ELECTRE III/IV methods to multiple level, multiple criteria evaluation of urban transportation projects. *Transportation Research Procedia*, 10, 820-830.

Zegeer, C. V., Deen, R. C., & Mayes, J. G. (1980). *The Effect of Lane and Shoulder Widths on Accident Reductions on Rural, Two-Lane Roads*. Bureau of Highways, Department of Transportation, Commonwealth of Kentucky.

Zeleny, M. (1982). *Multi criteria decision making*. New York: McGraw-Hills.

Zeleny, M., & Cochrane, J. L. (1973). *Multiple criteria decision making*. University of South Carolina Press.

Zimmermann, H. J. (1996). Fuzzy Control. In *Fuzzy set theory and its applications* (p. 203-240). Springer Netherlands.

Zopounidis, C., & Doumpos, M. (2002). Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 138(2), 229-246.