

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA



*Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Informatica e dell'Automazione*

***Materiali e metodologie per il decommissioning di
piattaforme oil and gas***

Materials and methodologies for the decommissioning of oil and gas platforms

Relatore:
DOTT. SCARADOZZI DAVID

Correlatore:
ING. SCREPANTI LAURA

Laureando:
LATIANO GIOVANNI

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Il progetto	5
1.2	Obiettivo del progetto	5
2	Decommissioning delle piattaforme offshore	7
2.1	Introduzione al problema	7
2.2	Procedura di decommissioning	9
3	Multi Criteria Decision Making e Metodologia	11
3.1	Introduzione ai Multi Criteria Decision Making (MCDM)	11
3.2	Introduzione all'Analytic Hierarchy Process	12
3.3	Scomposizione del problema e struttura gerarchica	13
3.4	Costruzione matrice di comparazione	17
3.5	Consistenza dei giudizi	18
3.6	Punteggio alternative	20
4	Modello per Decommissioning ed Implementazione Software	21
4.1	Gruppo di decisori	21
4.2	Aggregazione dei giudizi degli esperti	22
4.3	Implementazione software del modello di decommissioning	23
4.3.1	Definizione Input programma	24
4.3.2	Creazione nodi AHP	25
4.3.3	Survey decisori e matrici di giudizio	26
4.3.4	Aggregazione matrici	28
4.3.5	Calcolo pesi e check consistenza	29
4.3.6	Calcolo punteggi opzioni decommissioning	31
4.4	Testing e box-plot	32
5	Conclusioni e sviluppi futuri	37

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Il progetto

Questa tesi va a descrivere il lavoro svolto nei mesi di Novembre e Dicembre durante il tirocinio presso il laboratorio LabMACS riguardante lo studio e la costruzione di un modello decisionale multi attributo per il decommissionamento degli impianti offshore.

1.2 Obiettivo del progetto

Il progetto di ricerca, svolto in collaborazione con il Dipartimento Di Scienze Della Vita E Dell'Ambiente (DISVA) e con il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura (DICEA), consiste nello studio del problema di decommissioning allo scopo di:

- individuare gli aspetti più rilevanti che influenzano la scelta per i problemi decommissioning;
- utilizzare quindi tali aspetti per costruire un modello decisionale;

Il presente lavoro di tesi è strutturato come segue, verranno prima affrontati concetti elementari per poi introdurre più nozioni su tali elementi, ogni parte è propedeutica alla successiva. Viene quindi strutturata come segue:

- nella prima parte verrà introdotto il problema di *decommissioning delle piattaforme offshore* nel dettaglio;
- nella seconda parte verrà approfondito l'approccio utilizzato, ovvero la metodologia di *Multi Criteria Decision Making (MCDM)*, verrà quindi introdotto il metodo *Analytic Hierarchy Process (AHP)* ed i parametri del modello;

- nella terza parte verrà effettuata la trattazione matematica del modello AHP per l'aggregazione dei giudizi degli esperti, verrà quindi illustrato il codice scritto per l'implementazione del modello;
- infine nella quarta ed ultima parte verranno esposte le conclusioni, con degli spunti per i possibili sviluppi futuri;

Capitolo 2

Decommissioning delle piattaforme offshore

2.1 Introduzione al problema

Lo sviluppo di impianti offshore di gas e petrolio è iniziato più di cento anni fa, in particolare dal 1897 [2]. Da allora le tecnologie di esplorazione, raccolta, stoccaggio del petrolio e del gas sono cresciute rapidamente, in particolare per quanto riguarda la sicurezza con il fine di ridurre ogni possibilità di incidente. Dall'inizio del 21^o secolo sono stati costruiti circa 7500 impianti offshore in tutto il mondo. Queste strutture si trovano principalmente nel Mare del Nord, nel Golfo del Messico e nelle aree offshore vicino alla California e del sud-est asiatico. Circa l'85% di essi deve essere smantellato nei prossimi decenni [1], e secondo le convenzioni internazionali e regionali dei paesi che hanno partecipato, la maggior parte degli impianti devono essere completamente smantellati *onshore* per poi venire riciclati nel Mare del Nord. Tuttavia questo significa alti costi di disattivazione, un enorme rischio per l'ambiente marino e problemi di sicurezza per gli operatori umani. Una piattaforma standard ha un ciclo di vita che va da 20 a 30 anni a seconda del design strutturale e della situazione della zona marina, tuttavia a causa di qualche motivo, alcune delle infrastrutture arrivano a 50 anni di vita [1]. Si può quindi affermare che le date di fine vita delle piattaforme sono da considera di natura molto dinamica, e ciò non fa altro che complicare la pianificazione delle attività di decommissioning. La mancanza di pianificazione del ciclo di vita è quindi da identificare come fattore di contributo alla crescita dei costi delle operazioni di smantellamento. In una recente indagine, è stato evidenziato che il sottodimensionamento del budget per alcuni progetti di decommissioning è il risultato della mancanza di parametri di riferimento durante la preparazione dei piani [3]. Le convenzioni internazionali e le normative nazionali relative alla rimozione degli impianti offshore sono state istituite dal 1958 [4]. Il processo di ingegneristico di disattivazione degli

impianti è molto chiaro: per la maggior parte delle strutture è "sufficiente" eseguire il processo di installazione a ritroso, quindi partendo dalla chiusura per arrivare alla pulizia del fondo marino [7]. Tuttavia la riduzione dei rischi di costruzione e dell'impatto ambientale porta ad alcune modifiche nel processo. Il processo di disattivazione è illustrato nello specifico in Figura 2.1.

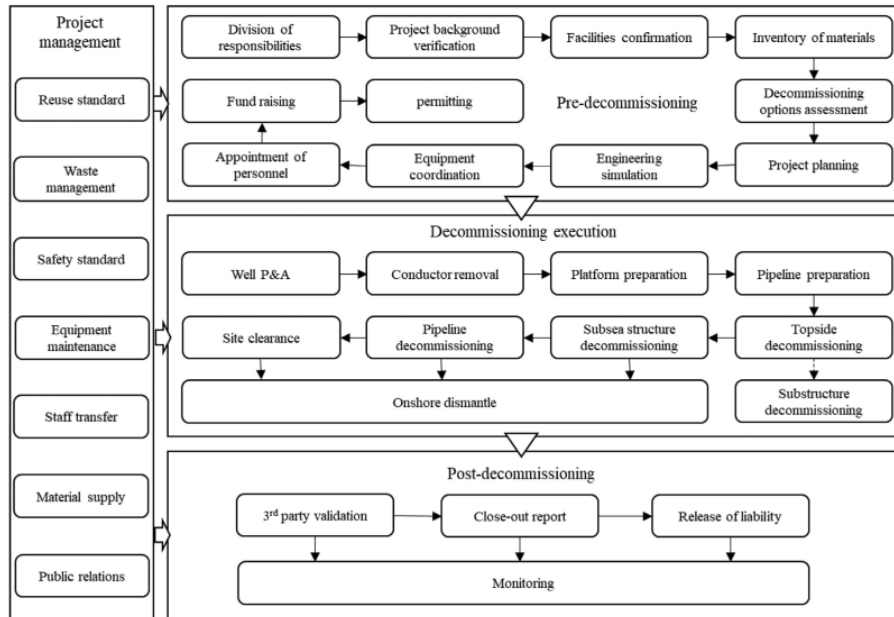


Figura 2.1: Procedura di decommissioning [7].

La mancanza di modelli decisionali multiattributo efficienti e facili da usare è un problema importante che i decisori, ovvero le aziende governative ed energetiche, devono affrontare. Essere in grado di prendere in considerazione molteplici fattori e valutare in modo contemporaneo i costi, i rischi e l'impatto ambientale è molto importante per il processo decisionale e per la sua gestione. Il modello decisionale multi-attributo deve quindi essere in grado di prendere decisioni bilanciando tutti questi aspetti. Tuttavia quando si tratta di pianificare progetti di decommissioning, le incertezze, le complessità e la scarsità di informazioni rendono difficile per un gruppo di decisori arrivare alla soluzione "migliore" basata esclusivamente su un processo decisionale intuitivo. Tali modelli devono quindi anche rendere l'interpretazione e la gestione di grandi quantità di dati e criteri, più gestibili attraverso processi strutturati e algoritmi matematici.

2.2 Procedura di decommissioning

Prima di iniziare a studiare il modello decisionale multi-attributo, è importante comprendere la procedura di decommissioning. La procedura ingegneristica per il decommissionamento è adottata dalle stesse imprese del settore di produzione, infatti generalmente il processo di smantellamento è l'inverso del processo di installazione, con opportune modifiche in base alla decisione presa sulla futuro della piattaforma, l'attrezzatura e la tecnologia presente a bordo, la sicurezza e le caratteristiche ambientali [7]. L'intero processo, quindi dalla pianificazione iniziale al monitoraggio continuo dopo il completamento del progetto, è ampiamente riconosciuto ed approvato dal mondo accademico e dalle industrie. Vi sono inoltre altri aspetti che si adattano alle diverse leggi e regolamenti applicati dai governi dei vari paesi.

L'intero processo di disattivazione si compone di tre fasi: *pre-smantellamento*, *esecuzione dello smantellamento*, *post-smantellamento e gestione del progetto*.

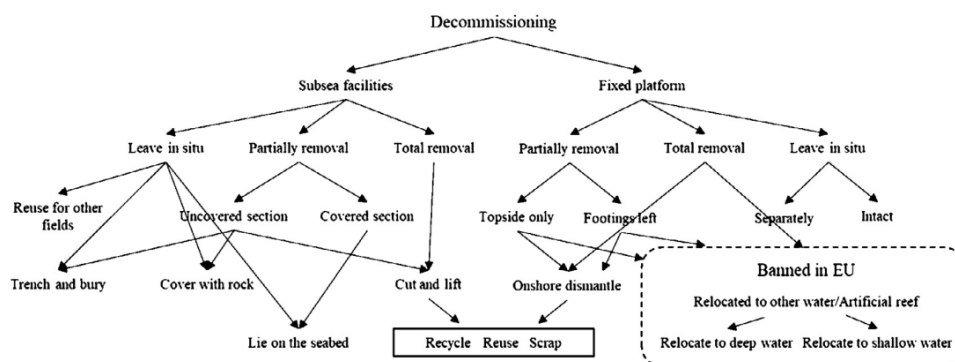


Figura 2.2: Albero opzioni di decommissioning per piattaforme fisse e semi-sommerse [7].

La prima fase è il pre-smantellamento, l'obiettivo di questa fase è quello di prendere decisioni e fare il piano per l'attuazione di progetti di disattivazione, preparare il materiale ed il personale, infine ottenere permessi governativi. Ci sono dieci passaggi principali, tra cui la divisione di responsabilità, la raccolta di informazioni ingegneristiche della piattaforma, la valutazione dei costi, dei rischi e dell'impatto ambientale, il processo decisionale, la simulazione ingegneristica, la mobilitazione delle risorse e l'acquisizione di documenti governativi. Solitamente sono necessari circa due o tre anni per completare tutti i compiti, in questo fase possono unirsi anche società di terze parti al fine di fornire servizi di consulenza professionale. Di fatto è questa la fase in cui il mondo accademico ha maggiore interesse, i principali contributi di ricerca della comunità accademica in questa fase sono i quadri decisionali e

gli strumenti di valutazione allo scopo di consentire ai decisori di prendere decisioni in modo più intuitivo, semplice e giustificato. Sono identificati diversi quadri decisionali, alcuni si potrebbero focalizzare più sulla protezione ambientale, altri invece si concentrano sulla riduzione dei costi, alcuni si concentrano sul basso rischio, e naturalmente alcuni sono più equilibrati. La seconda fase è l'esecuzione dello smantellamento, il contenuto principale è l'attuazione del progetto di decommissionamento. I passaggi in questa parte dipendono dal tipo di piattaforma ovvero se si tratta di una piattaforma fissa, galleggiante o semi-sommergibile; dal tipo di testa pozzo e dalla decisione di smantellamento presa ovvero rimozione completa, rimozione parziale oppure riutilizzo. Ci sono diversi processi, la differenza principale si ha nella presenza o meno delle condutture e se sia necessario spostare o meno la sottostruttura con le tubazioni. In Figura 2.2 è raffigurato l'albero delle possibili opzioni di decommissioning. La rimozione del *Topside* è quasi sempre necessaria per via delle restrizioni e regolamenti nazionali. In Figura 2.2 è raffigurata una tipica piattaforma offshore.

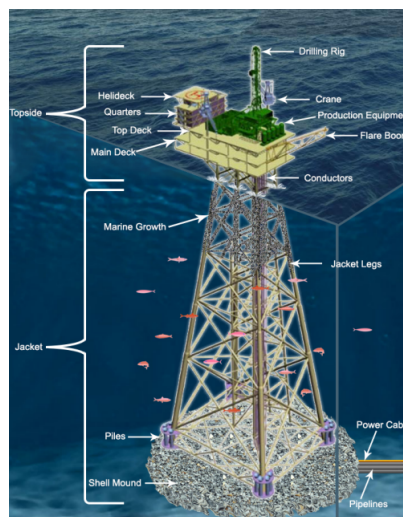


Figura 2.3: Disposizione tipica di una piattaforma fissa [13].

La terza fase è di importanza relativamente minore e viene utilizzata come sintesi dopo il completamento del progetto di smantellamento. Il contenuto principale è la convalida, il monitoraggio e la liberazione di responsabilità al fine di fornire al governo un rapporto di chiusura, a conferma che le strutture della piattaforma sono state disattivate in conformità e secondo i requisiti richiesti. La parte relativa alla gestione del progetto riguarda l'intero processo di smantellamento degli impianti con lo scopo di pianificare il progetto nella fase iniziale [7].

Capitolo 3

Multi Criteria Decision Making e Metodologia

3.1 Introduzione ai Multi Criteria Decision Making (MCDM)

I modelli di *Multi Criteria Decision Making (MCDM)* sono una classe generale di modelli di ricerca operativa e nascono allo scopo di valutare e prendere decisioni tra le varie alternative, sulla base di una molteplicità di criteri. Ci sono due tipi di MCDM, i *Multi Objective Decision Making (MODM)* ed i *Multi Attribute Decision Making (MADM)*. I MODM utilizzano la tecniche di ottimizzazione, quindi di solito comportano la massimizzazione/minimizzazione contemporanea di più funzioni obiettivo, risolvono quindi dei problemi di programmazione matematica. I MADM lavorano invece con dei problemi decisionali che coinvolgono una serie di alternative. Questi modelli si basano su una lista di criteri scelti, con parametri e variabili che si desiderano monitorare durante il processo decisionale. La categoria di MCDM è stata utilizzata per selezionare un numero minimo di alternative. Numerosi sono i metodi appartenenti ai MADM, tra i quali ritroviamo: *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Simple Additive Weighting (SAW)*, *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, *ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE)*. Di seguito una breve introduzione dei principali metodi.

- L'Analytic Hierarchy Process, in italiano Processo di Gerarchia Analitica, è un metodo utile per classificare le alternative in ambienti decisionali complessi. Tra le sue caratteristiche principali troviamo l'uso della matrice di confronto a coppie per confrontare le alternative rispetto ai vari criteri e la determinazione dei pesi dei vari criteri. Permette inoltre di essere usato in combinazione con altri metodi di MCDM.

- Il metodo SAW è anche chiamato metodo di combinazione lineare ponderata, consiste nel trovare la somma ponderata dei punteggi di ciascuna opzione per tutti gli attributi.
- TOPSIS si basa sul concetto che l'alternativa scelta dovrebbe avere la distanza geometrica minore dalla soluzione positiva ideale e la distanza geometrica maggiore dalla soluzione negativa ideale.
- Di solito i metodi ELECTRE sono utilizzati per scartare alcune alternative al problema, che sono inaccettabili, in seguito un'altra forma di MCDA può essere utilizzato per selezionare l'opzione migliore. Il vantaggio è che in seguito può essere usato un altro MCDM può con un insieme limitato di alternative, risparmiando molto tempo.

Il modello di sviluppato in questa tesi è il l' *Analitych Hierarchy Process* basato sui giudizi degli esperti.

3.2 Introduzione all'Analytic Hierarchy Process

Il metodo AHP è stato sviluppato da Thomas L. Saaty nel 1977 con il nome di *'theory of prioritized hierarchies'*, sin da quando è nato si è affermato come uno degli strumenti più potenti per il problema di decisione in quanto è particolarmente efficace nel costruire una classifica delle opzioni tramite le informazioni proveniente da un gruppo di esperti. Ad oggi ha numerose applicazioni in svariati campi, come ad esempio marketing, design, risk management, pianificazione. L'aumento del riconoscimento dell'AHP nei principali settori industriali può essere attribuito al fatto che esso ha effettivamente risolto i problemi in un periodo in cui non era disponibile alcuna quantificazione delle alternative [15]. Il metodo AHP si dimostra estremamente flessibile consentendo ad decisori di costruire una struttura gerarchica per il problema, che si adatta ai giudizi individuali dei singoli esperti e che permette di valutare contemporaneamente criteri qualitativi e quantitativi e di sviluppare un trade-off tramite le matrici di confronto a coppie dei vari criteri [10].

L'AHP è sviluppato sulla capacità intrinseca del cervello umano di strutturare ed esprimere una preferenza solo su due elementi alla volta [8]. In aggiunta i giudizi a coppie forniscono una scala di giudizi priva di dimensioni e permettono di confrontare aspetti tangibili ed intangibili [12], ciò quindi si dimostra particolarmente utile per molti problemi decisionali che sono intrinsecamente predisposti ad errori dovuti dall'inconsistenza e la soggettività dei giudizi da parte dei decisori. Tale metodo viene quindi utilizzato per supportare la scelta dei decisori, consentendo di assegnare priorità alle alternative considerate e di giungere alla soluzione più adatta alle specifiche richieste. L'acronimo *AHP* ha il seguente significato:

- *analytic*: il metodo è analitico, ovvero comporta la scomposizione del problema complesso nei suoi elementi costitutivi più semplici;
- *hierarchy*: indica un rapporto gerarchico di dominanza, ossia una albero al cui vertice è posto l'obiettivo e e sotto di esso, disposti in livelli successivi, i criteri ed i sottocriteri;
- *process*: il metodo consiste in un procedimento con il quale, attraverso una serie di operazioni, trasformazioni e modulazioni si arriva ad un risultato di tipo decisionale.

Dal punto di vista prettamente scientifico, sintetizzando, il metodo prevede due passaggi fondamentali; il primo passaggio consiste nello scomporre il problema da affrontare in sotto problemi gerarchicamente connessi fra loro, il secondo passaggio che consiste nell'affrontare i vari sottoproblemi specifici con una serie di confronti a coppie fra le diverse opportunità di scelta, attribuendo a ciascun confronto un punteggio di importanza relativa, per concludersi, con l'assegnazione di un peso unitario o percentuale. La somma di tutti i pesi percentuali sarà pari ad uno.

3.3 Scomposizione del problema e struttura gerarchica

L'identificazione e la selezione dei criteri è stata sviluppata sulla base della letteratura ed è un aspetto fondamentale per la costruzione del modello gerarchico AHP, in figura 3.1 è rappresentata la struttura gerarchica ottenuta. La gerarchia beneficia della proprietà di indipendenza interna fra gli elementi dello stesso livello ed al contempo della proprietà di dipendenza esterna tra gli elementi di un livello rispetto a quelli di un livello superiore, si ha inoltre una visione dettagliata del problema. I criteri ed i sottocriteri individuano quindi gli aspetti fondamentali dell'area del problema a cui essi si riferiscono. D'ora in avanti useremo il termine **MACRO INPUT (MI)** per riferirci ad i criteri ed il termine **INPUT DETTAGLIATO (ID)** per riferirci ad i sottocriteri relativi ad i criteri. I MACRO INPUT individuati sono sei e sono i seguenti:

- **INFORMAZIONI SULL'AREA;**
- **DETTAGLI SULLA PIATTAFORMA;**
- **OPERAZIONI DI SMANTELLAMENTO;**
- **COSTI ECONOMICI;**
- **IMPATTO SULL'ACCESSO MARINO;**
- **CONFORMITÀ;**

Ogni macro input è quindi composto a sua volta da un set di Input Dettagliati. Il primo MI *'INFORMAZIONI SULL'AREA'* raggruppa gli aspetti riguardando il sito dell'impianto, l'ambiente circostante e la fauna presente in prossimità della piattaforma, per questo MI sono stati individuati i seguenti ID:

- **POSIZIONE GPS;**
- **CLASSIFICAZIONE DELLA ZONA;**
- **PRESENZA DI ALTRE INFRASTRUTTURE NELLE VICINANZE;**
- **VICINANZA A RISERVE NATURALI;**
- **PRESENZA DI FAUNA LOCALE;**
- **QUALITÀ DELL'ACQUA;**

Il secondo MI riguarda i *'DETTAGLI SULLA PIATTAFORMA'*, in questo caso vengono raggruppati gli aspetti tecnici relativi alla piattaforma e l'eventuale presenza di strumenti e materiale a bordo, vengono quindi individuati i seguenti ID:

- **PESO;**
- **MATERIALE;**
- **ATTREZZATURA A BORDO;**
- **TIPO DI PIATTAFORMA;**
- **DIMENSIONE POZZO;**
- **TUBAZIONI;**
- **CAVI OMBELICALI;**
- **CAVI ELETTRICI;**
- **DECK;**
- **ATTREZZATURA MECCANICA;**
- **SISTEMA ENERGETICO;**
- **ALTRI ACCESSORI;**

Il terzo MI *'OPERAZIONI DI SMANTELLAMENTO'*, raggruppa gli aspetti relativi alle op. di smantellamento, l'attrezzatura e la manodopera necessaria, vengono quindi individuati i seguenti ID:

- **DIMENSIONI DELLA NAVE, MOTORE, EMISSIONI;**
- **OPERAZIONI DI SOLLEVAMENTO;**
- **OPERAZIONI DI TAGLIO;**
- **ATTREZZATURA NECESSARIA;**
- **REQUISITI HLV;**
- **OPERAZIONI DI TRASPORTO;**
- **TEMPO NECESSARIO;**
- **MANODOPERA RICHIESTA;**

Il quarto MI '*COSTI ECONOMICI*' raggruppa tutti gli aspetti economici del problema, gli ID individuati sono i seguenti:

- **AUTORIZZAZIONI;**
- **ASSICURAZIONE;**
- **PIANIFICAZIONE;**
- **PROJECT MANAGEMENT & ENGINEERING;**
- **PULIZIA DEL SITO;**
- **PREPARAZIONE DELLA PIATTAFORMA;**
- **RIMOZIONE DELLE CONDUTTURE;**
- **TRASPORTO E SMALTIMENTO;**
- **RIMOZIONE STRUTTURALE;**
- **MOBILITAZIONE HLV;**
- **MIGLIORAMENTO DELLA BARRIERA CORALLINA;**

Il quinto MI '*IMPATTO SULL'ACCESSO MARINO*' individua gli aspetti relativi all'ingombro della piattaforma e al suo impatto sulla navigazione marina, gli ID individuati sono i seguenti:

- **TIPO DI ACCESSO ALLA PIATTAFORMA;**
- **DISTANZA DALLA COSTA;**
- **ACCESSIBILITÀ AI DATI MARINI;**
- **NORME LEGALI;**

- PROFONDITÀ;
- TRAFFICO MARINO;

Infine il sesto ed ultimo MI 'CONFORMITÀ' è composto dai seguenti ID:

- GUARDIA COSTIERA;
- REGOLAMENTO MARITTIMO;
- SICUREZZA;

Sulla base delle opzioni di decommissioning vengono individuati nove possibili output del modello:

1. **LASCIARE IN POSIZIONE**, conservazione barriera corallina artificiale;
2. **LASCIARE IN POSIZIONE**, uso alternativo;
3. **RIMOZIONE PARZIALE**, uso alternativo;
4. **RIMOZIONE PARZIALE**, smantellamento e posizionamento sul fondo;
5. **RIMOZIONE PARZIALE**, smantellamento e trasporto a terra;
6. **RIMOZIONE PARZIALE**, smantellamento e trasporto in un altro sito offshore;
7. **RIMOZIONE TOTALE**, smantellamento e posizionamento sul fondo;
8. **RIMOZIONE TOTALE**, smantellamento e trasporto a terra;
9. **RIMOZIONE TOTALE**, smantellamento e trasporto in un altro sito offshore.

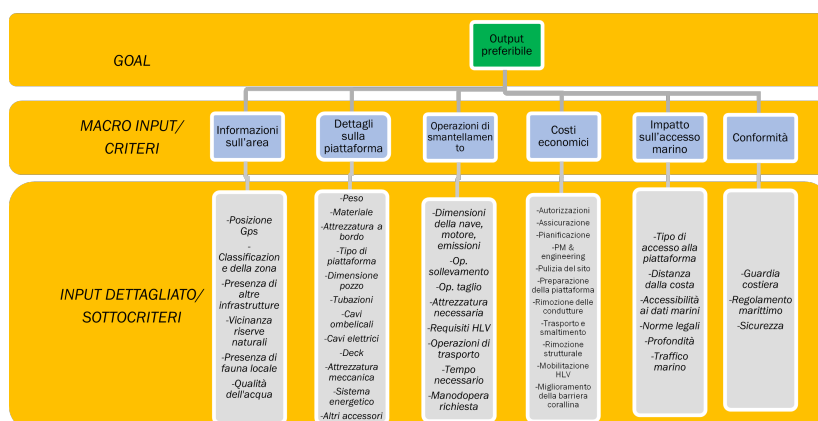


Figura 3.1: Struttura gerarchica del modello AHP di decommissioning.

3.4 Costruzione matrice di comparazione

Dopo aver costruito la struttura gerarchica del modello è quindi necessario costruire le *pairwise matrices*, in italiano *matrici di confronto a coppie*. Queste matrici servono per estrapolare la priorità, ovvero i **pesi** dei criteri e sottocriteri. Ipotizziamo di avere n criteri o sottocriteri da confrontare, la matrice dei confronti a coppie sarà costruita nel seguente modo:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

L'elemento generico a_{ij} della matrice quadrata rappresenta il grado di importanza del criterio/sottocriterio i rispetto al criterio/sottocriterio j . In letteratura sono numerose le scale di giudizio adottabili [6], in questo lavoro la scala utilizzata è quella di Saaty a 9 punti in tabella 3.1. Nel costruire

1	gli elementi i e j sono ugualmente importanti
3	l'elemento i è poco più importante dell'elemento j
5	l'elemento i è abbastanza più importante dell'elemento j
7	l'elemento i è decisamente più importante dell'elemento j
9	l'elemento i è assolutamente più importante dell'elemento j
2 4 6 8	giudizi intermedi
1/3	l'elemento i è poco meno importante dell'elemento j
1/5	l'elemento i è abbastanza meno importante dell'elemento j
1/7	l'elemento i è decisamente meno importante dell'elemento j
1/9	l'elemento i è assolutamente meno importante dell'elemento j
1/2 1/4 1/6 1/8	giudizi intermedi reciproci

Tabella 3.1: Scala dei giudizi a 9 punti di Saaty.

la matrice dei confronti a coppie, i decisori rispondono quindi alla domanda "*Quanto è importante il criterio/sottocriterio i al criterio/sottocriterio j ?*", di conseguenza assegnano un giudizio secondo la scala precedentemente introdotta.

Per n criteri da analizzare sono necessari $n(n - 1)/2$ confronti questo perchè conoscendo il giudizio a_{ij} , è possibile ricavare il grado di importanza del criterio/sottocriterio j rispetto al criterio/sottocriterio i semplicemente facendo il reciproco, ovvero $a_{ji} = 1/a_{ij}$. Gli elementi lungo la diagonale ovvero gli a_{ii} sono uguali ad 1, questo perchè il criterio/sottocriterio viene confrontato rispetto a se stesso.

La matrice finale ottenuta è **reciproca simmetrica**, nella seguente forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Nel modello gerarchico del nostro problema, 3.1, saranno quindi necessarie sette matrici di confronto a coppie, sei per il livello degli INPUT DETTAGLIATI ed una per il livello dei MACRO INPUT.

3.5 Consistenza dei giudizi

La matrice è detta simmetrica reciproca e **consistente** se:

1. vale la *relazione di reciprocità*, ovvero $a_{ji} = 1/a_{ij}$ per ogni i, j ;
2. vale la *relazione di transitività*, ovvero $a_{ji} = a_{jk} \times a_{ki}$ per ogni i, j, k .

Se si verificano tali condizioni allora la matrice è perfettamente consistente ed ha rango unitario. Inoltre l'unico autovalore non nullo è uguale all'ordine n della matrice e l'autovettore corrispondente che normalizzato fornisce i pesi degli elementi confrontati, è composto da elementi positivi. Prendiamo ad esempio una matrice A perfettamente consistente, quindi che risponde alle proprietà di reciprocità e transitività, di dimensione 3×3 in cui i pesi sono noti e gli elementi sono rappresentati come rapporto tra i loro pesi, quindi $a_{ij} = w_i/w_j$:

$$\begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & w_1/w_3 \\ w_2/w_1 & 1 & w_2/w_3 \\ w_3/w_1 & w_3/w_2 & 1 \end{bmatrix}$$

moltiplicando la matrice A per il vettore dei pesi $w = [w_1 \ w_2 \ w_3]^T$ si ottiene:

$$\begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & w_1/w_3 \\ w_2/w_1 & 1 & w_2/w_3 \\ w_3/w_1 & w_3/w_2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix}$$

L'autovalore $\lambda = n$ della matrice è 3, poiché $Aw = nw$ con n autovalore della matrice consistente e w il rispettivo autovettore cui corrisponde il vettore dei pesi. Poiché A ha rango unitario, in quanto tutte le altre righe sono multipli della prima, eccetto l'autovalore principale, tutti gli autovalori relativi sono nulli. In questo caso l'autovalore è n e la matrice ha un'unica soluzione non banale, ossia un'unica soluzione non nulla. Se i pesi non sono noti si può sfruttare la seguente equazioni per trovarli [11]:

$$Aw = \lambda w \tag{3.1}$$

disponendo della matrice A , pur sapendo che dai confronti a coppie risulteranno delle inconsistenze a causa delle quali l'equazione non sarà necessariamente soddisfatta. L'autovalore è utile per verificare la consistenza della matrice, cioè l'attendibilità dei giudizi dati dal decisore. Il grado di coerenza è infatti verificato mediante il calcolo dell'autovalore principale λ_{max} seguito dal calcolo del *Consistency Index* e del *Consistency Ratio*. Poiché la matrice di confronti a coppie consistente ha $\lambda_{max} = n$ il *Consistency Index* è:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.2)$$

se il valore di CI è zero allora la matrice è consistente; se devia da n allora la matrice non è perfettamente consistente. Tra le cause dell'inconsistenza dell'indice si riscontrano la carenza di informazioni, gli errori umani di giudizio nella fase di inserimento dati, oppure una reale inconsistenza del modello dovuta ad una errata modellazione del sistema e scelta di criteri/sottocriteri. A partire dal CI è quindi possibile calcolare il *Consistency Ratio*:

$$CR = \frac{CI}{RI(n)} \quad (3.3)$$

dove $RI(n)$ è il *Random Index* corrispondente ad n criteri/sottocriteri. Il RI è stato derivato da Saaty da un campione di 500 matrici reciproche generate casualmente utilizzando la scala di Saaty a 9 punti [9]. In tabella 3.2 è rappresentata la Tabella dei RI fino ad un massimo di 15 elementi. La matrice dei giudizi è accettabile se il CR è minore di 0.1, se così non fosse è quindi necessario rivedere i giudizi. Tuttavia Saaty afferma che un pò di incosistenza è necessaria in quanto ci permette di acquisire nuove informazioni [9]. Saaty fornisce un modo per stimare l'errore di giudizio tramite le seguenti equazioni:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} e_{ij} \quad (3.4)$$

$$e_{ij} = 1 + d_{ij} \quad (3.5)$$

il termine e_{ij} costituisce un errore di tipo moltiplicativo dovuto all'errore umano di giudizio, è evidente che se la matrice di giudizio è perfettamente consistente allora $e_{ij} = 1$. Per piccoli d_{ij} , $2*CI$ è una stima della varianza di d_{ij} ed è possibile quindi sviluppare un test di ipotesi sulla consistenza della matrice di giudizio [9].

n	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.57	1.58

Tabella 3.2: Random Indexes fino a 15 elementi.

3.6 Punteggio alternative

Verificata la consistenza dei giudizi è quindi possibile calcolare i pesi. Prima di procedere è necessario distinguere i pesi globali e locali. I pesi dei criteri/sottocriteri vengono calcolati attraverso l'equazione 3.1 e vengono normalizzati rispetto ad uno. Definiamo i pesi dei sottocriteri come *pesi locali*, vengono quindi moltiplicati per il peso relativo al criterio corrispondente ottenendo così i *pesi globali*. Questa operazione è necessaria per poter normalizzare ad uno tutti i pesi dei sottocriteri del problema. Il passo successivo è quello di assegnare un punteggio alle alternative ovvero di determinare i loro pesi. È possibile farlo in due modi, il primo consiste nella normalizzazione dei dati quantitativi del problema, quindi ad esempio normalizzando rispetto ad uno i costi, tempi, risorse e così via, il secondo metodo è quello di costruire ulteriori matrici di confronti a coppie, in questo caso però vengono confrontate tutte le alternative rispetto a tutti i criteri/sottocriteri, anche in questo caso si ottengono quindi dei pesi normalizzati rispetto ad uno. Il passaggio finale consiste nel calcolo della classifica delle alternative, viene effettuato tramite la seguente formula:

$$R_i = \sum_k^m w_k r_{ik} \quad (3.6)$$

dove R_i è il punteggio assegnato all'alternativa i -esima, w_k è il peso globale del sottocriterio k -esimo, r_{ik} è il peso globale dell'alternativa i -esima rispetto al criterio k -esimo. Computando la precedente equazione per tutte le alternative si ottengono quindi i punteggi di tutte le alternative, di conseguenza è possibile costruire una classifica e l'alternativa con il punteggio più alto sarà quindi l'opzione preferibile del problema.

Capitolo 4

Modello per Decommissioning ed Implementazione Software

Nel precedente capitolo è stato introdotto il metodo AHP con la sua trattazione matematica, in questo capitolo approfondiamo il metodo applicato al nostro problema di decommissioning, in particolare quando si ha a che fare con un gruppo di decisori. Verrà quindi trattata l'implementazione del modello tramite Matlab.

4.1 Gruppo di decisori

Come spiegato in precedenza, il problema di decommissioning prende in considerazione svariati aspetti, che vanno da quelli economici a quelli ambientali e sociali, è quindi impossibile affidare ad un unico stakeholder il compito di prendere le decisioni. È necessario affidarsi ad un gruppo di decisori, in questo caso un gruppo di esperti di decommissioning, biologi e tecnici. In Figura 4.1 è raffigurato il workflow della metodologia, questo processo è stato ideato da **Kai Lun Na** ed il suo team durante la costruzione di un modello AHP per il decommissionamento nelle acque della Malaysia [8]. Il primo passo è l'acquisizione delle informazioni da parte degli esperti attraverso un'intervista, il pannello di esperti dovrebbe essere composto da un numero variabile tra 7 a 35 esperti [5] in modo proporzionale per tipologia per riuscire a coprire tutti gli aspetti del problema. L'intervista avviene tramite un *survey*, viene chiesto agli esperti di esprimere il giudizio relativo tra due criteri/-sottocriteri secondo la scala di Saaty a 9 punti in Tabella 3.1, le risposte formeranno quindi gli elementi a_{ij} delle matrici dei confronti a coppie. Ottenute le matrici di confronto a coppie è necessario controllare la consistenza dei giudizi, per fare ciò si calcolano quindi i *Consistency Index* e *Consistency Ratio* tramite le equazioni 3.2 e 3.3. Come spiegato nel capitolo precedente, se il *CR* è minore di 0.1 allora la matrice dei giudizi è valida. Se il *CR* è maggiore di 0.1 la matrice non è valida, si può quindi rifiutare il giudizio

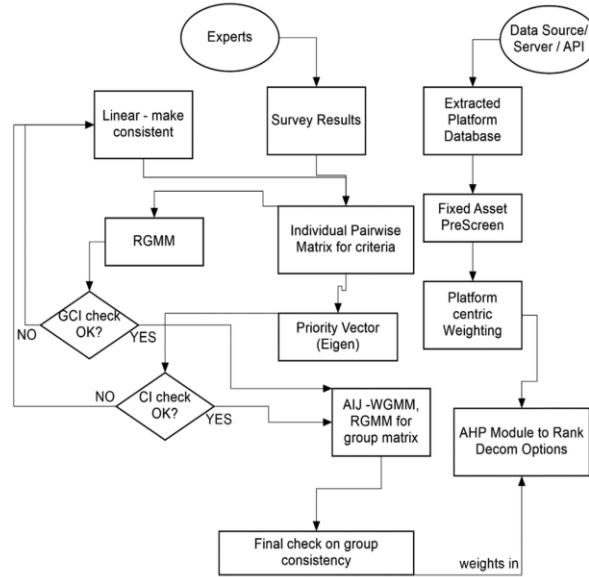


Figura 4.1: Workflow metodologia [8].

dell'esperto, fare una nuova intervista, oppure *linearizzare* la matrice al fine di renderla consistente. La linearizzazione di matrici non consistenti è un argomento ampiamente studiato in letteratura, tuttavia nel corso di questo lavoro non è stato trattato, quindi le alternative valide saranno le prime due citate.

4.2 Aggregazione dei giudizi degli esperti

Ottenute le matrici di confronto a coppie consistenti di tutti gli esperti è necessario aggregarle in un'unica matrice che esprima il giudizio dell'intero gruppo. Il metodo di aggregazione utilizzato è il *Weighted Geometric Mean Method (WGMM)* [14], in quanto riesce a conservare la proprietà di reciprocità ottenuta nelle matrici di confronto a coppie dei criteri/sottocriteri [8]. Definiamo la matrice di confronto del decisore k-esimo in equazione 4.1 ed il vettore dei pesi ottenuto dalle matrici del decisore k-esimo in equazione 4.2

$$A^{[k]} = (a_{ij}^{[k]}) \quad i, j \in (1, n) \quad (4.1)$$

$$w^{[k]} = (w_1^{[k]}, w_2^{[k]}, \dots, w_n^{[k]}) \quad (4.2)$$

con n il numero dei criteri/sottocriteri, ed il vettore dei pesi $w^{[k]}$ tale che rispetti la seguente relazione:

$$w_i^{[k]} > 0, \quad \sum_{i=1}^n w_i^{[k]} = 1. \quad (4.3)$$

Se β_k è l'importanza del contributo del k-esimo decisore nel gruppo, dove

$$\sum_{k=1}^r \beta_k = 1, \quad \beta_k \geq 0 \quad (4.4)$$

allora la matrici aggregate dei giudizi del gruppo vengono calcolate con il WGMM con la seguente equazione:

$$A^{[G]} = (a_{ij}^{[G]}), \quad \text{dove} \quad (a_{ij}^{[G]}) = \prod_{k=1}^r (a_{ij}^{[k]})^{\beta_k}, \quad i, j \in (1, n). \quad (4.5)$$

Ottenute le matrici aggregate dei giudizi degli esperti è quindi possibile calcolare i pesi dei criteri/sottocriteri, in questo caso però non viene usato il metodo dell'autovalore suggerito da Saaty, ma viene usato il *Row Geometric Mean Method (RGMM)* [14], come mostrato nella seguente equazione:

$$w^{[G]} = (w_i^{[G]}), \quad \text{dove} \quad (w_i^{[G]}) = \prod_{j=1}^n (a_{ij}^{[G]})^{1/n}, \quad i, j \in (1, n) \quad (4.6)$$

il vettore dei pesi viene poi normalizzato rispetto ad uno. Dopo aver usato il RGMM è necessario controllare che le matrici aggregate siano ancora consistenti, a tal proposito viene calcolato il *Geometric Consistency Index* come mostrato nella seguente equazione:

$$GCI = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{i < j} \log^2(e_{ij}) \quad \text{dove} \quad e_{ij} = a_{ij} \frac{w_j}{w_i} \quad (4.7)$$

il termine e_{ij} è l'errore umano di giudizio come spiegato nel capitolo precedente, mentre il GCI deve essere minore di 0.37 [14].

Ottenuti tutti i pesi dei criteri/sottocriteri si può quindi procedere prima con il calcolo dei pesi globali e dei pesi delle alternative, come spiegato nel capito precedente, ed in seguito con il calcolo dei punteggi delle alternative come mostrato in equazione 3.6. L'alternativa con il punteggio più alto sarà quindi l'opzione di decommissioning preferibile.

4.3 Implementazione software del modello di decommissioning

Nei precedenti paragrafi è stata spiegata la metodologia del modello AHP ed in particolare la sua applicazione per il problema di decommissioning, in questo paragrafo viene spiegata l'implementazione software sviluppata del modello AHP per il decommissionamento degli impianti offshore. Il linguaggio utilizzato per la scrittura del codice è il *Matlab* in quanto per sua natura lavora molto bene sia con equazioni e matrici, sia con strutture dati quali

table e struct. Il software sviluppato si compone da un file *main.m* ovvero il corpo principale del programma, da una serie di *funzioni* e da una classe *ahpNode*. Prima di procedere è bene precisare come verrà affrontata la trattazione del software, si partirà quindi dal *main.m* per poi spiegare tutti i metodi e le operazioni man mano che si avanza con il programma.

4.3.1 Definizione Input programma

```

1  %% Definizione 'macro input' ed 'input dettagliato'
   del modello AHP - 0
2  % Definizione degli input del modello, alternative
   output e caricamento parametri piattaforma
3
4  MILabel = ["INFORMAZIONI SULL'AREA", "DETTAGLI SULLA
   PIATTAFORMA", "OPERAZIONI DI SMANTELLAMENTO", "
   COSTI ECONOMICI", "IMPATTO SULL'ACCESSO MARINO", "
   CONFORMITA"];
5
6  IALabel = ["POSIZIONE GPS", "CLASSIFICAZIONE DELLA
   ZONA", "PRESENZA ALTRE INFRASTRUTTURE", "VICINANZA
   A RISERVE NATURALI", "PRESENZA FAUNA LOCALE", "
   QUALIT  DELL'ACQUA"];
7
8  DPLabel = ["PESO", "MATERIALE", "ATTREZZATURA A BORDO
   ", "TIPO DI PIATTAFORMA", "DIMENSIONE POZZO", "
   TUBAZIONI", "CAVI OMBELICALI", "CAVI ELETTRICI", "
   DECK", "ATTREZZATURA MECCANICA", "SISTEMA
   ENERGETICO", "ALTRI ACCESSORI"];
9
10 OSLabel = ["DIM NAVE", "OP. SOLLEVAMENTO", "OP. TAGLIO
   ", "ATTREZZATURA NECESSARIA", "REQUISITI HLV", "OP
   . TRASPORTO", "TEMPO NECESSARIO", "MANODOPERA
   RICHIESTA"];
11
12 CELabel = ["AUTORIZZAZIONI", "ASSICURAZIONE", "
   PIANIFICAZIONE", "PM & ENG", "PULIZIA DEL SITO", "
   PREPARAZIONE PIATTAFORMA", "RIMOZIONE DELLE
   CONDUTTURE", "TRASPORTO E SMALTIMENTO", "RIMOZIONE
   SRUTTURALE", "MOBILITAZIONE HLV", "MIGLIOLAMENTO
   DELLA BARRIERA CORALLINA"];
13
14 IMLabel = ["TIPO DI ACCESSO ALLA PIATTAFORMA", "
   DISTANZA", "ACCESSIBILITA AI DATI MARINI", "NORME
   LEGALI", "PROFONDIT ", "TRAFFICO MARINO"];

```



```

15
16 COLabel = ["GUARDIA COSTIERA", "REGOLAMENTO MARITTIMO
           ", "SICUREZZA"];
17
18 load alternativesWeights.mat C

```

In questa sezione del programma vengono definiti tutti gli input del programma ovvero quelli che saranno i criteri (Macro Input) ed i sottocriteri (Input Dettagliato) del modello gerarchico AHP, infine vengono caricati i parametri della piattaforma attraverso il comando `load alternativesWeights.mat C`. E' importante precisare che i parametri della piattaforma, ovvero `alternativesWeights.mat` sono normalizzati rispetto ad uno e possono essere ottenuti attraverso i dati quantitativi della piattaforma.

4.3.2 Creazione nodi AHP

Definiti gli elementi della struttura gerarchica è necessario quindi implementare tale struttura attraverso i nodi AHP. A tal proposito è stata definita la classe `ahpNode.m`.

```

1      classdef ahpNode < handle
2
3          properties
4              nameNode           % nome nodo AHP
5              criteriaNode       % criteri del nodo
6              preNode            % nodo padre
7              numberDecisors     % numero decisori nodo
8              weightDecisors     % peso decisori
9              pairwiseMatrix     % pairwise matrix
              % decisori
10             aggregatedMatrix    % pairwise matrix
              % aggregata
11             errorMatrix        % matrici errori
              % coerenza giudizi
12             localWeights       % pesi locali
13             globalWeights      % pesi globali
14             consistencyIndex    % consistenza /
              % geometrica matrice aggregata
15
16         end
17     ...
18     end

```

Questo prototipo consiste in un nodo generico del modello AHP con le proprietà e con i metodi, come vedremo in seguito, che implementano le equazioni viste in precedenza.

Tornando al main, nel seguente codice vengono quindi create sette istanze della classe *ahpNode*, una relativa ad i *Macro Input*, quindi il livello gerarchico più alto, e sei relative agli *Input Dettagliati*, al livello gerarchico inferiore.

```

1  %% Creazione nodi modello AHP tramite istanza classe
   'ahpNode' - 1
2
3  macroInput = ahpNode('MACRO INPUT', MILabel, 'nope');
4  infoArea = ahpNode('INFORMAZIONI SULL''AREA', IALabel
   , macroInput);
5  dettPiattaforma = ahpNode('DETTAGLI SULLA PIATTAFORMA
   ', DPLabel, macroInput);
6  opSmantellamento = ahpNode('OPERAZIONI DI
   SMANTELLAMENTO', OSLabel, macroInput);
7  costiEconomici = ahpNode('COSTI ECONOMICI', CELabel,
   macroInput);
8  impattoMarino = ahpNode('IMPATTO SULL''ACCESSO MARINO
   ', IMLabel, macroInput);
9  cOnformita = ahpNode('CONFORMIT ' , COLabel,
   macroInput);

```

Il metodo di istanza della classe è il seguente:

```

1  function obj = ahpNode(name, criteria, node)
2         % builder
3         obj.nameNode = name;
4         obj.criteriaNode = criteria;
5         obj.preNode = node; % obj.preNode = 'nope
   ' -> nodo padre
6  end

```

Il metodo di istanza della classe prende come parametri di ingresso il **nome** del nodo, i **criteri** e l'eventuale **nodo padre**, ovvero il nodo a livello gerarchico superiore, se il nodo non ha alcun nodo padre allora è necessario passare come parametro la stringa 'nope'.

4.3.3 Survey decisori e matrici di giudizio

Il passo successivo è quello di ottenere le matrici di giudizio da poter inserire nei nodi per il calcolo dei pesi. È possibile fare ciò attraverso due metodi come mostrato nel seguente codice:

```

1  %% Creazione/Caricamento Pair-wised Matrix - 2
2  % Compila il survey per ottenere le pairwised
   matrix, oppure caricare le

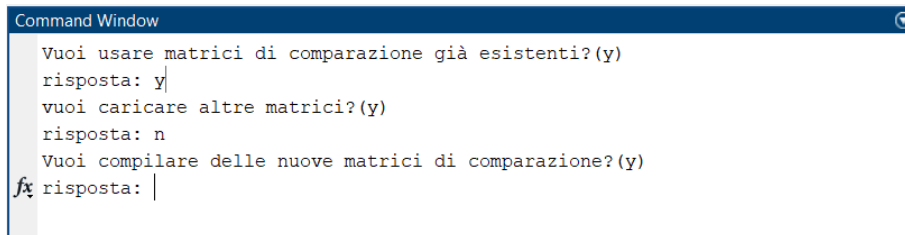
```

```

3  %   pairwised matrix gi esistenti
4
5  S0 = []; S1 = []; S2 = []; S3 = []; S4 = []; S5 = [];
   S6 = [];
6
7  % apertura matrici salvate tramite la funzione
   openMatrix()
8  [S0,S1,S2,S3,S4,S5,S6] = openMatrix(S0,S1,S2,S3,S4,S5
   ,S6);
9
10 % somministrazione survey attraverso la funzione
   expertSurvey()
11 [S0,S1,S2,S3,S4,S5,S6] = expertSurvey(S0,S1,S2,S3,S4,
   S5,S6,MILabel,IALabel,DPLabel,OSLabel,CELabel,
   IMLabel,COLabel);

```

nella riga 5 vengono create le matrici temporanee vuote che ospiteranno i giudizi, in riga 8 attraverso il metodo `openMatrix(..)`, viene aperto un dialogo nella *console command* in cui viene domandato se si vuole caricare delle matrici precedentemente salvate. È possibile rispondere attraverso la riga di comando. Nella seguente figura è illustrato il dialogo.



Dopo aver eventualmente caricato le matrici viene chiesto se si vuole compilare delle nuove matrici di comparazione, rispondendo affermativamente 'y', inizia quindi il survey dei decisori. Anche in questo caso i decisori devono interagire con la console command rispondendo alle domande che vengono effettuate. Il survey viene erogato attraverso il metodo `expertSurvey(..)`, i parametri di ingresso saranno quindi le **matrici temporanee** precedentemente create ed i **criteri/sottocriteri** dei nodi AHP. La prima domanda posta nel survey è il numero dei decisori. Stabilito il numero dei decisori viene dunque richiesto di esprimere i giudizi di importanza relativa secondo la scala di Saaty come mostrato nella seguente figura.

```

Command Window
-----MACRO INPUT SURVEY-----
Quanto è importante INFORMAZIONI SULL'AREA rispetto a DETTAGLI SULLA PIATTAFORMA?
valore: 6
Quanto è importante INFORMAZIONI SULL'AREA rispetto a OPERAZIONI DI SMANTELLAMENTO?
valore: 4
Quanto è importante INFORMAZIONI SULL'AREA rispetto a COSTI ECONOMICI?
valore: 8
Quanto è importante INFORMAZIONI SULL'AREA rispetto a IMPATTO SULL'ACCESSO MARINO?
fx valore:

```

Completato il survey è necessario caricare le matrici dei giudizi ottenute dai decisori nei nodi AHP, tale operazione viene effettuata attraverso il metodo delle classe `ahpNode.getMatrix(...)` come mostrato nel seguente frammento di codice del main:

```

1 macroInput.getMatrix(S0, 1/size(S0,3)*ones(size(S0
,3), 1));
2 infoArea.getMatrix(S1, 1/size(S1,3)*ones(size(S1,3),
1));
3 dettPiattaforma.getMatrix(S2, 1/size(S2,3)*ones(size(
S2,3),1));
4 opSmantellamento.getMatrix(S3, 1/size(S3,3)*ones(size
(S3,3),1));
5 costiEconomici.getMatrix(S4, 1/size(S4,3)*ones(size(
S4,3),1));
6 impattoMarino.getMatrix(S5, 1/size(S5,3)*ones(size(S5
,3),1));
7 cOnformita.getMatrix(S6, 1/size(S6,3)*ones(size(S6,3)
,1));

```

In seguito è riportato il metodo `ahpNode.getMatrix(...)` nel dettaglio:

```

1 function obj = getMatrix(obj,matrix,weightdec)
2     % metodo acquisizione matrici
3     obj.pairwisedMatrix = matrix;
4     obj.numberDecisors = size(matrix,3);
5     obj.weightDecisors = weightdec;
6 end

```

Questo metodo prende in ingresso le **matrici dei giudizi** ottenute dal survey ed i **pesi dei decisori** che quantificano l'importanza delle matrici di ognuno dei decisori.

4.3.4 Aggregazione matrici

Il passo successivo è l'aggregazione delle matrici di giudizio, tale operazione viene implementata nel seguente frammento di codice del main:

```

1 macroInput.aggreatedMatrixCalc();
2 infoArea.aggreatedMatrixCalc();
3 dettPiattaforma.aggreatedMatrixCalc();
4 opSmantellamento.aggreatedMatrixCalc();
5 costiEconomici.aggreatedMatrixCalc();
6 impattoMarino.aggreatedMatrixCalc();
7 cOnformita.aggreatedMatrixCalc();

```

La matrice dei giudizi aggregata viene calcolata attraverso il metodo della classe `ahpNode.aggreatedMatrixCalc()`, in questo caso non è necessario passare alcun parametro in ingresso in quanto il metodo utilizza le matrici ed i pesi dei decisori precedentemente caricati. Il metodo di aggregazione delle matrici è il WGMM spiegato in eq. 4.5. Il codice è il seguente:

```

1     function obj = aggreatedMatrixCalc(obj)
2         % metodo aggregazione matrici esperti in
3         % unica matrice
4         if obj.numberDecisors > 1
5             % se numero decisori > 1
6             % metodo calcolo matrice aggregata
7             temp = obj.pairwisedMatrix;
8             for i = 1:obj.numberDecisors
9                 temp(:, :, i) = temp(:, :, i).^obj.
10                    weightDecisors(i);
11             end
12             obj.aggreatedMatrix = prod(temp, 3);
13         else
14             % altrimenti
15             obj.aggreatedMatrix = obj.
16                 pairwisedMatrix;
17         end
18     end

```

Nel caso in cui il decisore sia uno, allora la matrice aggregata corrisponde direttamente alla matrice ottenuta dal survey.

4.3.5 Calcolo pesi e check consistenza

Il passo successivo è il calcolo prima dei **pesi locali** e successivamente dei **pesi globali**, per poi effettuare la **verifica di consistenza**. Tale operazioni vengono implementate attraverso il seguente frammento di codice del main:

```

1     % Calcolo pesi locali
2     macroInput.localweightsCalc();
3     ..

```

```

4      ..
5      cOnformita.localweightsCalc();
6
7      % Verifica consistenza
8      macroInput.consistencyCalc();
9      ..
10     ..
11     cOnformita.consistencyCalc();
12
13     % Calcolo pesi globali
14     MacroInput.globalweightsCalc();
15     ..
16     ..
17     cOnformita.globalweightsCalc();

```

Il calcolo dei pesi locali viene effettuato attraverso il metodo della classe `ahpNode.localWeightsCalc()`, questo metodo non necessita di alcun parametro esterno in quanto utilizza le matrici aggregate precedentemente calcolate. I pesi locali vengono calcolati tramite il RGMM spiegato in eq. 4.6. Il codice è il seguente:

```

1      function obj = localweightsCalc(obj)
2          % metodo calcolo pesi locali tramite
3          % media geometrica
4          obj.localWeights = geomean(obj.
5              aggregatedMatrix,2)./sum(geomean(obj.
6                  aggregatedMatrix,2));
7
8          end

```

Viene dunque verificata la consistenza attraverso il GCI, implementato attraverso il metodo della classe `ahpNode.consistencyCalc()`. In eq. 4.7 è illustrato il GCI, il calcolo dell'indice è quindi implementato attraverso il seguente codice:

```

1      function obj = consistencyCalc(obj)
2          % metodo calcolo consistenza / geometrica
3          if obj.numberDecisors > 1
4              n = size(obj.criteriaNode,2);
5              obj.errorMatrix = zeros(n,n);
6              for i = 1:n-1
7                  for j = i+1:n
8                      obj.errorMatrix(i,j) = obj.
9                          aggregatedMatrix(i,j)*obj.
10                             localWeights(j)/obj.localWeights(i);
11
12                  end
13              end
14          end

```

```

10     end
11     logmatrix = log(obj.errorMatrix).^2;
12     obj.consistencyIndex = (2/((n-1)*(n-2)))*sum(
        triu(logmatrix,1),"all");
13 end

```

Per avere la certezza che i pesi generati siano attendibili è necessario che il GCI sia minore di 0.37. Verificata la consistenza vengono dunque calcolati i pesi globali attraverso il metodo della classe `ahpNode.globalWeightsCalc` come illustrato nel seguente codice:

```

1 function obj = globalweightsCalc(obj)
2     % metodo calcolo pesi globali
3     if isobject(obj.preNode) == 0
4         % allora nodo padre
5         obj.globalWeights = obj.localWeights;
6     else
7         % altrimenti nodo figlio
8         obj.globalWeights = obj.localWeights
            .*obj.preNode.globalWeights(find(
                obj.preNode.criteriaNode == obj.
                nameNode));
9     end
10 end

```

Nel caso in cui il metodo viene richiamato da un nodo padre, allora i pesi globali corrispondono ai pesi locali, al contrario nel caso di un nodo figlio, i pesi globali corrisponderanno ai pesi locali moltiplicati per il peso locale del criterio corrispondente del nodo padre. I pesi globali ottenuti possono quindi essere stampati a schermo tramite il metodo della classe `ahpNode.weightsPlot()`.

4.3.6 Calcolo punteggi opzioni decommissioning

Il passo finale è il calcolo dei punteggi delle opzioni di decommissioning per stabilire l'opzione preferibile. Tale operazione viene implementata tramite il metodo `optionScore(...)`, i parametri di ingresso sono tutti i nodi del modello e la matrice contenente i parametri della piattaforma normalizzati, come mostrato nel seguente frammento di codice:

```

1 optionScoreTable = optionScore(macroInput,
        infoArea,dettPiattaforma, opSmantellamento,
        costiEconomici,                impattoMarino,
        cOnformita,C)

```

In output il metodo restituisce una *table* contenente le opzioni ed il loro punteggio, viene inoltre stampato un *pie chart* raffigurante i punteggi delle opzioni in percentuale ed i GCI di tutti i nodi del modello per poter quindi valutare la bontà di tali risultati.

4.4 Testing e box-plot

In questa sezione verranno illustrati i risultati ottenuti simulando la compilazione dei survey ed i parametri della piattaforma. Vista la riservatezza dei dati riguardanti le piattaforme offshore, i parametri relativi alla piattaforma normalizzati ed i giudizi sono stati assegnati in modo arbitrario e sono da intendersi al solo fine di *testing* del software sviluppato.

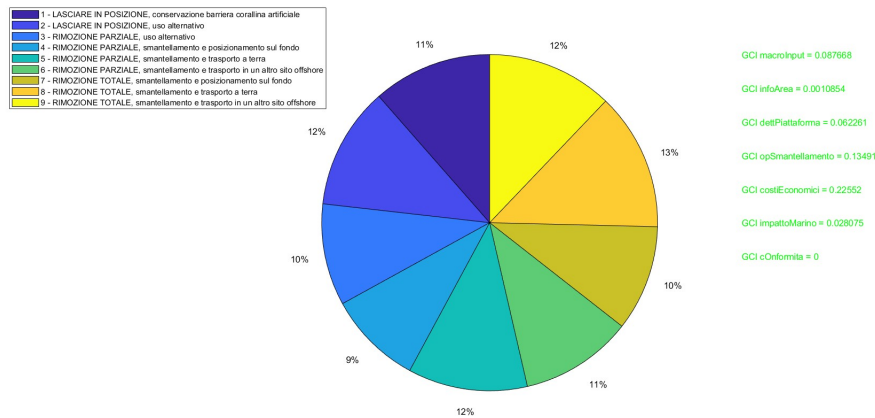


Figura 4.2: Output finale affidabile.

In Figura 4.2 è rappresentato l'output finale ottenuto simulando la compilazione del survey da parte di cinque esperti in maniera coerente. Come si può notare tutti i GCI delle aree del modello in verde sono minori di 0.37, ciò significa che tutti i giudizi di importanza relativa tra criteri ed i sottocriteri sono stati assegnati in maniera coerente, inoltre il ranking finale ottenuto può essere ritenuto affidabile, vedendo al primo posto l'opzione di smantellamento "*RIMOZIONE TOTALE, smantellamento e trasporto a terra*". Nelle seguenti tabelle sono rappresentati i pesi globali ottenuti del modello.

<i>MACRO INPUT</i>	<i>PESI</i>
<i>Informazioni sull'Area</i>	0.054521
<i>Dettagli sulla Piattaforma</i>	0.069113
<i>Operazioni di Ssmantellamento</i>	0.17852
<i>Costi Economici</i>	0.28272
<i>Impatto sull'Accesso Marino</i>	0.29243
<i>Conformità</i>	0.1227

Tabella 4.1: Vettore pesi gruppo normalizzato dei MACRO INPUT.

Come si può notare dalla Tabella 4.1, i MACRO INPUT con un peso maggiore rispetto agli altri sono *Costi Economici* e *Impatto sull'Accesso Marino*, ciò significa quindi che influenzano parecchio l'output finale, puntando verso soluzioni che minimizzano i suddetti aspetti.

<i>INFORMAZIONI SULL'AREA</i>	<i>PESI</i>
<i>Posizione Gps</i>	0.0028303
<i>Classificazione Della Zona</i>	0.0088419
<i>Presenza Altre Inf..</i>	0.0059012
<i>Vicinanza A Riserve Natu..</i>	0.012316
<i>Presenza Fauna Loc..</i>	0.012316
<i>Qualità Dell'Ac..</i>	0.012316

<i>DETTAGLI SULLA PIATTAFORMA</i>	<i>PESI</i>
<i>Peso</i>	0.0074749
<i>Materiale</i>	0.0038932
<i>Attrezzatura A Bordo</i>	0.0034027
<i>Tipo Di Piattaforma</i>	0.011285
<i>Dimensione Pozzo</i>	0.0099341
<i>Tubazioni</i>	0.0038741
<i>Cavi Ombelicali</i>	0.0035526
<i>Cavi Elettrici</i>	0.0035526
<i>Deck</i>	0.0096987
<i>Attrezzatura Meccanica</i>	0.0038279
<i>Sistema Energetico</i>	0.005248
<i>Altri Accessori</i>	0.0033697

<i>OPERAZIONI DI SMANTELLAMENTO</i>	<i>PESI</i>
<i>Dim Nave</i>	0.01279
<i>Op. Sollevamento</i>	0.019311
<i>Op. Taglio</i>	0.014782
<i>Attrezzatura Necessaria</i>	0.01555
<i>Requisiti Hlv</i>	0.017139
<i>Op. Trasporto</i>	0.021991
<i>Tempo Necessario</i>	0.04063
<i>Manodopera Richiesta</i>	0.036326

<i>COSTI ECONOMICI</i>	<i>PESI</i>
<i>Autorizzazioni</i>	0.033622
<i>Assicurazione</i>	0.034967
<i>Pianificazione</i>	0.033443
<i>Pm & Eng</i>	0.017073
<i>Pulizia Del Sito</i>	0.016851
<i>Preparazione Piattaforma</i>	0.017947
<i>Rimozione Delle Condutture</i>	0.017619
<i>Trasporto E Smaltimento</i>	0.01947
<i>Rimozione Strutturale</i>	0.020736
<i>Mobilizzazione Hlv</i>	0.020467
<i>Migliolamento Della Barriera Corallina</i>	0.050522

<i>IMPATTO SULL'ACCESSO MARINO</i>	<i>PESI</i>
<i>Tipo Di Accesso Alla Piattaforma</i>	0.041693
<i>Distanza</i>	0.054871
<i>Accessibilità Ai Dati Marini</i>	0.058134
<i>Norme Legali</i>	0.045244
<i>Profondità</i>	0.046799
<i>Traffico Marino</i>	0.045691

<i>CONFORMITÀ</i>	<i>PESI</i>
<i>Guardia Costiera</i>	0.024539
<i>Regolamento Marittimo</i>	0.049079
<i>Sicurezza</i>	0.049079

Tabella 4.2: Vettore pesi globali gruppo normalizzato degli INPUT DETTAGLIATI.

Nel seguente esempio è stata simulata la compilazione del survey da parte di cinque esperti che assegnano i punteggi di preferenza in maniera randomica e quindi commettendo errori di giudizio non trascurabili.

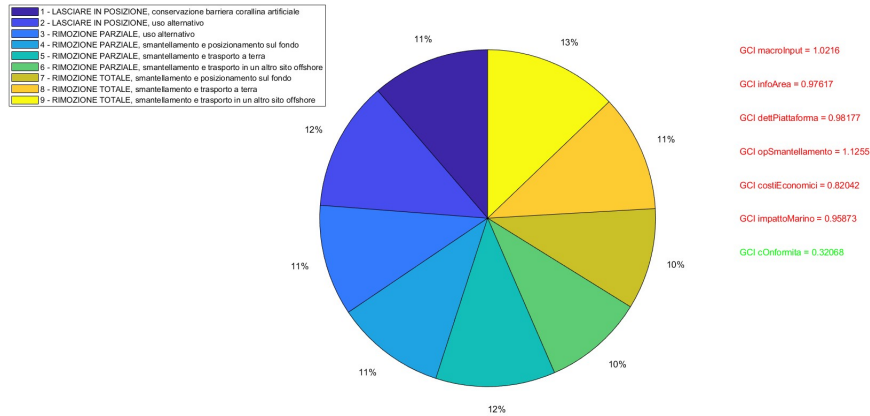


Figura 4.3: Output finale inaffidabile.

In Figura 4.3 è quindi rappresentato l'output finale ottenuto. I GCI ottenuti sono ben al di sopra della soglia di 0.37 imposta, dimostrando quindi un ranking finale delle opzioni di decommissioning non affidabile, vedendo al primo posto l'opzione di smantellamento "*RIMOZIONE TOTALE, smantellamento e trasporto in un altro sito offshore terra*", diversa dall'opzione preferibile nel caso precedente.

È interessante studiare come si distribuiscono i pesi di un campione di gruppi di decisori. A tal proposito si è simulato un campione di sedici gruppi formati da cinque esperti attraverso il survey, come mostrato nelle seguenti figure.

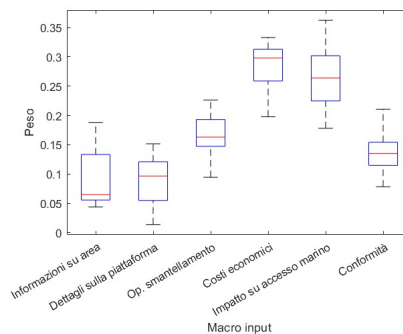


Figura 4.4: Box-plot distribuzione pesi MACRO INPUT.

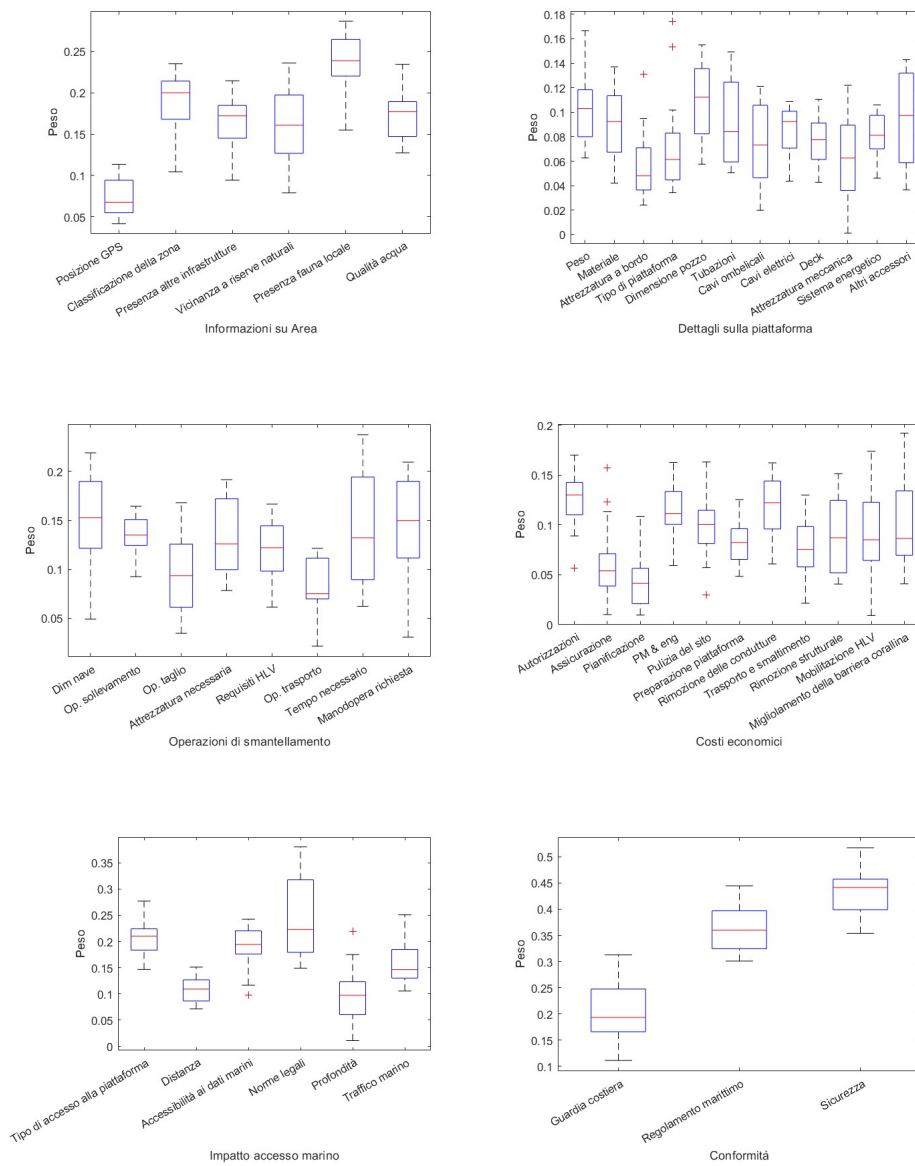


Figura 4.5: Box-plot distribuzione pesi INPUT DETTAGLIATO.

Osservando la Figure 4.4 e 4.5 è evidente che i pesi si distribuiscono normalmente con qualche eccezione data dai *valori outlier*.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Il fine vita delle piattaforme oil and gas è diventata una questione di interesse mondiale, ed è al centro di molte discussioni che coinvolgono regolatori, aziende e enti governativi. A causa dell'elevato numero di soggetti o esperti interessati nelle diverse aree, è importante analizzare più criteri per prendere una decisione. Si concorda generalmente sul fatto che i criteri ed i sottocriteri selezionati dovrebbero riguardare aspetti economici, ambientali, tecnici, sociali e di sicurezza. I metodi MCDM sono confermati dalla letteratura come potenti strumenti per affrontare complessi problemi decisionali. I MCDM sono ampiamente applicati per supportare le decisioni nei problemi di decommissioning di qualunque natura, in quanto hanno il vantaggio di aggregare le opinioni delle diverse parti interessate. In questo lavoro è stato analizzato ed implementato il metodo AHP allo scopo di fornire uno strumento di supporto alle decisioni, con particolare attenzione al caso in cui i decisori siano multipli. Il metodo AHP si dimostra essere una tecnica semplice che genera punteggi globali per ogni alternativa, in grado di mettere in relazione aspetti sia quantitativi che qualitativi e che a differenza di altri metodi, è in grado di generare i pesi dei criteri/sottocriteri. A causa di questa caratteristica il metodo AHP può essere usato come strumento secondario in combinazione con altri metodi di MCDM. Un possibile sviluppo futuro potrà quindi essere l'uso combinato del metodo AHP con altri metodi di MCDM, usando quindi l'AHP per il calcolo dei pesi del modello, e l'ulteriore metodo di MCDM per il calcolo dell'opzione di decommissioning preferibile. Una miglioria del modello attuale costruito potrebbe essere l'implementazione di metodi di *linearizzazione* delle matrici non consistenti, evitando quindi agli esperti di dover ricompilare il survey in caso di matrici non consistenti.

Bibliografia

- [1] «A multi-criteria decision approach to decommissioning of offshore oil and gas infrastructure». In: *Ocean Coastal Management* 87 (2014), pp. 20–29.
- [2] F. W B. Howard B. «In Petroleum Engineering Handbook». In: *Richardson* (1987).
- [3] McKinsey Company. «From Late-life Operations to Decommissioning - Maximizing Value at Every Stage». In: *Journal of Ocean Engineering and Science* (2015).
- [4] «Convention on the International Maritime Organization». In: *IMO* (1958).
- [5] Jacqueline Day e Milena Bobeva. «A generic toolkit for the successful management of Delphi studies». In: *Electronic Journal of Business Research Methods* 3.2 (2005), pp.103–116.
- [6] Alessio Ishizaka e Ashraf Labib. «Analytic hierarchy process and expert choice: Benefits and limitations». In: *Or Insight* 22.4 (2009), pp. 201–220.
- [7] Yihong Li e Zhiqiang Hu. «A review of multi-attributes decision-making models for offshore oil and gas facilities decommissioning». In: *Journal of Ocean Engineering and Science* (2021).
- [8] KL Na et al. «An expert knowledge based decommissioning alternative selection system for fixed oil and gas assets in the South China Sea». In: *Ocean Engineering* 130 (2017), pp. 645–658.
- [9] Roseanna W Saaty. «The analytic hierarchy process—what it is and how it is used». In: *Mathematical modelling* 9.3-5 (1987), pp. 161–176.
- [10] Thomas L Saaty. «Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process». In: *Management science* 32.7 (1986), pp. 841–855.
- [11] Thomas L Saaty. «Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary». In: *European journal of operational research* 145.1 (2003), pp. 85–91.

- [12] Thomas L Saaty e Luis G Vargas. «The possibility of group welfare functions». In: *International Journal of Information Technology & Decision Making* 4.02 (2005), pp. 167–176.
- [13] «Smith Figure 13-1, modified by MRS Environmental, Inc». In: (2016).
- [14] Denis Ssebuggwawo, SJBA Hoppenbrouwers e Erik Proper. «Group decision making in collaborative modeling: aggregating individual preferences with AHP». In: (2009).
- [15] Fatemeh Zahedi. «The analytic hierarchy process—a survey of the method and its applications». In: *interfaces* 16.4 (1986), pp. 96–108.

Elenco delle figure

2.1	Procedura di decommissioning [7].	8
2.2	Albero opzioni di decommissioning per piattaforme fisse e semi-sommerse [7].	9
2.3	Disposizione tipica di una piattaforma fissa [13].	10
3.1	Struttura gerarchica del modello AHP di decommissioning. . .	16
4.1	Workflow metodologia [8].	22
4.2	Output finale affidabile.	32
4.3	Output finale inaffidabile.	35
4.4	Box-plot distribuzione pesi MACRO INPUT.	35
4.5	Box-plot distribuzione pesi INPUT DETTAGLIATO.	36