



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea Luglio 2024

Prospettive e Sfide per un'Economia Spaziale Sostenibile

Analisi e proiezioni verso il 2040

Relatori:
Federico Caviggioli
Marianna Valente

Candidati:
Francesco Messina

Dedica

1. <i>Capitolo di Introduzione</i>	6
1.1 Introduzione.....	6
1.1.1. Confini e definizione	7
1.1.2. Trend e applicazioni	9
1.1.3. Attori coinvolti	11
1.1.4. Storia	12
1.2. Sostenibilità	14
1.2.1. Economia sostenibile	14
1.2.1. Parallelismo con Beni Comuni.....	15
1.3. La Posizione dell'Italia	16
2. <i>Metodologia</i>	18
2.1. Metodo Delphi.....	18
2.2. Descrizione Database e Questionario.....	20
2.2.1. Descrizione Database.....	20
2.2.2. Descrizione Questionario	24
3. <i>Analisi e Risultati</i>	26
3.1. Space Laws and Regulations.....	26
3.1.1. Introduzione	26
3.1.2. Analisi	29
3.2. Space policies.....	33
3.2.1. Introduzione	33
3.2.2. Analisi	35
3.3. Debris mitigation	39
3.3.1. Introduzione e Criticità.....	39
3.3.2. Soluzioni di Mitigazione.....	40
3.3.3. Stakeholders	44
3.3.4. Analisi Criticità	46
3.3.5. Analisi Mitigazione e Stakeholders.....	46
3.4. Access to space	50
3.4.1. Introduzione	50
3.4.2. Stakeholders	52
3.4.3. Analisi	54
3.5. Remote sensing and data handling.....	58
3.5.1. Introduzione	58
3.5.2. Stakeholders	60
3.5.3. Analisi	61

3.6.	Life support system and ISRU.....	64
3.6.1.	Introduzione	64
3.6.2.	Stakeholders	64
3.6.3.	Analisi	65
3.7.	Spacecraft	69
3.7.1.	Introduzione	69
3.7.2.	Stakeholders	70
3.7.3.	Analisi	71
4.	<i>Conclusioni</i>	75
	<i>Indice delle figure</i>	79
	<i>Bibliografia</i>	80

1. Capitolo di Introduzione

1.1 Introduzione

“The space economy is the full range of activities that create value to human beings through exploring, researching, understanding, managing, and utilizing space. It includes all actors engaged in developing, providing and using space-related products and services: research and development, space infrastructure, space-derived applications, as well as the resulting scientific knowledge. The space economy thus goes far beyond the space sector in the narrow sense to encompass many others: think of agriculture, environmental protection, natural resource management and transportation, to name a few. The space economy is now worth \$469 billion globally, with double-digit percentage growth forecast for the coming decades. Most importantly, it will provide opportunities for less developed countries, contributing to the achievement of sustainable development goals.” (OECD Publishing, Organisation for Economic Co-operation and Development Staff, 2012)

La definizione sviluppata dall'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OECD) nel 2012 ha segnato l'inizio di una nuova fase di approfondimento per l'economia dello spazio. Questo elaborato si propone di esplorarne i flussi e l'evoluzione, analizzando le sue componenti fondamentali e il suo impatto su scala globale.

L'economia dello spazio comprende tutte quelle attività economiche e industriali legate allo spazio, includendo la produzione e il lancio di satelliti, le telecomunicazioni e la navigazione satellitare, l'esplorazione spaziale e molte altre attività correlate. Questa disciplina, analogamente allo spazio che esplora, offre un potenziale illimitato e in continua evoluzione. In questo senso, il volto dell'esplorazione spaziale ha subito una trasformazione radicale negli ultimi decenni. Inizialmente alimentata dalle tensioni geopolitiche della Guerra Fredda e dominata da programmi spaziali nazionali, l'esplorazione spaziale era caratterizzata da un forte controllo governativo. Negli ultimi anni, invece, la space economy ha visto l'ingresso di un mix di attori commerciali, scientifici e strategici, tra cui governi, aziende private, istituti di ricerca e organizzazioni internazionali (Bank of America Merrill Lynch, 2017). I governi continuano a svolgere un ruolo cruciale nella promozione e regolamentazione delle attività spaziali, ma la crescente partecipazione del settore privato ha introdotto nuove dinamiche competitive e collaborative. La diversificazione degli attori coinvolti ha portato a un'accelerazione dell'innovazione tecnologica e a un'espansione delle opportunità economiche: oggi le aziende private si avvalgono di ingenti investimenti in ricerca e sviluppo per sviluppare tecnologie avanzate per la produzione e il lancio di satelliti e per l'esplorazione e l'estrazione di risorse spaziali. Questo sta portando a una riduzione dei costi e a un aumento dell'accessibilità alle tecnologie spaziali. L'esplorazione spaziale vede ora una crescente partecipazione di attori privati e consorzi internazionali. Missioni ambiziose, come l'esplorazione di Marte e la costruzione di stazioni spaziali commerciali, sono diventate realtà grazie alla collaborazione tra pubblico e privato. Questi sforzi congiunti non solo avanzano la frontiera della conoscenza umana, ma creano anche nuove opportunità economiche e commerciali. Gli sviluppi tecnologici e l'innovazione hanno alimentato una crescita del settore senza precedenti e la crescente domanda di servizi ne ha catalizzato l'espansione offrendo, di fatto, straordinarie opportunità per l'innovazione, la collaborazione internazionale e lo sviluppo sostenibile. Le telecomunicazioni e la navigazione satellitare hanno rivoluzionato numerosi settori economici sulla Terra, offrendo nuovi servizi e migliorando l'efficienza di quelli esistenti (OECD Publishing, Organisation for Economic Co-operation and Development Staff, 2012). La connettività globale, resa possibile dai satelliti, ha facilitato la diffusione di informazioni e ha permesso lo sviluppo di nuove applicazioni, come il monitoraggio

ambientale, l'agricoltura di precisione e la gestione delle catastrofi naturali. Secondo i dati dell'ultimo report di Euroconsult datato 2022 il valore della Space Economy a livello mondiale si attesta a circa 460 miliardi di dollari ed è destinato a crescere nei prossimi anni. L'analisi dei flussi economici e delle tendenze emergenti in questo settore è essenziale per comprendere le future traiettorie di sviluppo e per identificare le opportunità ma anche le sfide che caratterizzeranno l'espansione delle attività umane nello spazio. I rischi, in questo senso, si legano ai costi elevati associati alla progettazione, alla costruzione e al lancio dei satelliti, ai pericoli tecnologici e ambientali dell'esplorazione e alle complessità legali e geopolitiche che riguardano la proprietà delle risorse spaziali, la regolamentazione delle attività spaziali e la gestione dei detriti spaziali.

L'obiettivo principale di questa tesi è esplorare in profondità le dinamiche dell'economia dello spazio ed esaminarne le principali sfaccettature, fornendo così un quadro esaustivo di questo fenomeno complesso e multidimensionale. Attraverso un'analisi dettagliata delle evoluzioni storiche, degli attori coinvolti e delle tendenze future, si determineranno le implicazioni sociopolitiche, ambientali ed economiche che ne derivano e si cercherà, in questo modo, di delineare un panorama completo delle opportunità e delle sfide che l'economia dello spazio presenta nel suo complesso, con un occhio di riguardo alla sostenibilità. L'ambito della space economy si presenta come un vasto panorama di tematiche interconnesse, caratterizzato da una complessità che riflette l'ampiezza delle sfide e delle opportunità che offre. È cruciale comprendere che molti trattati e iniziative saranno ripetutamente menzionati all'interno di questa trattazione per due principali ragioni. In primo luogo, la space economy abbraccia una gamma estremamente diversificata di argomenti, dai sistemi di lancio e la gestione dei rifiuti spaziali alla regolamentazione delle risorse extraterrestri e la sostenibilità ambientale nello spazio. Questa diversità di tematiche implica la necessità di trattare più volte alcuni concetti fondamentali che attraversano settori e discipline. In secondo luogo, i trattati internazionali che regolano l'esplorazione e l'utilizzo dello spazio hanno formulazioni che spesso si estendono su diverse aree di interesse. Ad esempio, i principi etici riguardanti l'esplorazione spaziale possono essere collegati sia alla protezione ambientale che alla gestione delle risorse, rendendo inevitabile la loro inclusione in diversi capitoli di questo lavoro. Questa rilevanza ripetuta dei trattati e delle iniziative richiede un'analisi attenta e approfondita, al fine di cogliere appieno le implicazioni multidimensionali della space economy e di guidare lo sviluppo futuristico in modo responsabile e sostenibile. Navigare attraverso queste tematiche richiede un approccio integrato che consideri l'interconnessione tra normative, tecnologie emergenti e impatti socio-economici, per garantire che lo spazio rimanga una risorsa condivisa e vantaggiosa per tutta l'umanità nel lungo periodo.

1.1.1. Confini e definizione

Il concetto di "economia dello spazio" si è evoluto nel tempo per includere una vasta gamma di attività e utilizzi delle risorse spaziali. I confini della space economy sono influenzati da fattori tecnologici, economici, politici e sociali, e si estendono oltre i confini fisici della Terra per includere attività nello spazio profondo e su altri corpi celesti. L'economia dello spazio, oggi, si riferisce all'insieme delle attività economiche che coinvolgono l'utilizzo dello spazio extra-atmosferico e delle risorse spaziali. Si includano non solo le attività direttamente connesse allo spazio, come la ricerca, lo sviluppo, la produzione e l'uso dell'infrastruttura spaziale, ma anche tutte quelle applicazioni digitali che utilizzano prodotti e tecnologie sviluppati nel settore spaziale come input intermedio. Ne consegue che dare una definizione univoca di economia dello spazio è pressoché impossibile visti i confini fluidi e in continua evoluzione. Il dibattito, tuttavia, ha portato negli anni a una serie di consultazioni internazionali per

standardizzarne il significato. Attualmente, vi è un consenso generale nel definire l'economia dello spazio in due segmenti principali: upstream e downstream.

Il settore upstream della space economy comprende tutte quelle attività che sono direttamente coinvolte nella progettazione, produzione, lancio e gestione dei veicoli spaziali e delle infrastrutture orbitali. Più specificamente, le principali componenti di questo segmento includono:

- Progettazione e produzione di veicoli spaziali: questo include la costruzione di satelliti, sonde spaziali, stazioni spaziali, e moduli abitativi. Le aziende operanti in questo ambito devono affrontare sfide tecnologiche significative, tra cui la miniaturizzazione dei componenti, l'aumento della durata operativa dei dispositivi e la riduzione dei costi di produzione.
- Sistemi di lancio: un'altra componente critica del settore upstream riguarda lo sviluppo e il lancio di razzi vettori. Questi sistemi sono essenziali per mettere in orbita satelliti e altre infrastrutture spaziali. L'innovazione in questo campo è fondamentale per ridurre i costi di accesso allo spazio, con tecnologie come i razzi riutilizzabili che stanno rivoluzionando il settore.
- Infrastrutture orbitali e di supporto: questo segmento include lo sviluppo di stazioni spaziali, piattaforme di ricerca orbitale e sistemi di comunicazione spaziale. Le infrastrutture orbitali sono cruciali per supportare missioni di lunga durata e per garantire la continuità delle operazioni spaziali.
- Tecnologie di propulsione e di energia: la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie di propulsione, come i motori a ioni e i propulsori a energia solare, sono essenziali per migliorare l'efficienza delle missioni spaziali. Inoltre, le soluzioni per la generazione e la gestione dell'energia nello spazio sono fondamentali per il funzionamento continuo delle infrastrutture spaziali.
- Servizi di supporto al lancio: questi includono attività di pianificazione e gestione dei lanci, supporto logistico, e gestione del rischio. Questi servizi sono essenziali per garantire che i lanci avvengano in modo sicuro e tempestivo.

Le sfide principali per il settore upstream comprendono l'alto costo dei lanci spaziali, la complessità tecnologica e la necessità di innovazione continua per affrontare le rigide condizioni dello spazio. Tuttavia, le opportunità sono altrettanto significative, con un mercato in espansione per satelliti commerciali, missioni di esplorazione e sviluppo di infrastrutture spaziali.

Il settore downstream della space economy si concentra sull'utilizzo dei dati e dei servizi derivati dalle infrastrutture spaziali per applicazioni terrestri. Questo segmento include una vasta gamma di attività che trasformano i dati satellitari in informazioni utili per diversi settori economici. Le principali componenti del settore downstream sono (OECD Publishing, Organisation for Economic Co-operation and Development Staff, 2012):

- Telecomunicazioni: questo è uno dei segmenti più sviluppati del settore downstream. I satelliti per telecomunicazioni forniscono servizi di trasmissione dati, televisione, e comunicazioni mobili. Questi servizi sono fondamentali per connettere aree remote e migliorare l'accesso alle comunicazioni globali.
- Osservazione della Terra: i satelliti di osservazione terrestre forniscono dati critici per monitorare l'ambiente, gestire le risorse naturali, e supportare la risposta alle emergenze. Le immagini satellitari sono utilizzate in agricoltura, silvicoltura, gestione delle risorse idriche e monitoraggio dei cambiamenti climatici.

- Navigazione e posizionamento: i sistemi di navigazione satellitare, come il GPS, sono essenziali per una vasta gamma di applicazioni, dall'automazione dei trasporti alla logistica, alla navigazione marittima e aerea. Questi sistemi forniscono dati di posizionamento e temporizzazione estremamente precisi, che sono fondamentali per molte applicazioni commerciali e militari.
- Servizi geospaziali: l'integrazione dei dati satellitari con altre fonti di dati geospaziali supporta una vasta gamma di applicazioni, come la cartografia, la gestione del territorio, e l'urbanistica. Questi servizi sono utilizzati da governi, aziende private, e organizzazioni non governative per migliorare la pianificazione e la gestione delle risorse.
- Applicazioni commerciali e di consumo: il settore downstream include anche applicazioni dirette ai consumatori, come i servizi di meteo, le applicazioni di monitoraggio del traffico, e i servizi di geolocalizzazione per dispositivi mobili. Questi servizi sono sempre più integrati nelle attività quotidiane delle persone, migliorando la qualità della vita e l'efficienza operativa.

Le sfide per il settore downstream includono la necessità di integrare grandi volumi di dati provenienti da diverse fonti, garantire la sicurezza e la privacy dei dati, e sviluppare modelli di business sostenibili. Tuttavia, le opportunità sono enormi, con una crescente domanda di dati satellitari e servizi geospaziali in quasi tutti i settori economici.

La distinzione tra i settori upstream e downstream della space economy sottolinea la complessità e la diversità delle attività coinvolte nell'esplorazione e nell'utilizzo dello spazio. Il settore upstream si concentra sullo sviluppo delle tecnologie avanzate e delle infrastrutture necessarie per accedere e operare nello spazio, includendo la progettazione e la costruzione di satelliti, lanciatori e stazioni spaziali. Allo stesso tempo, il settore downstream si dedica alla valorizzazione dei dati e dei servizi derivati dalle attività spaziali per applicazioni terrestri, come la comunicazione satellitare, l'osservazione della Terra e la navigazione globale. Questa segmentazione riflette non solo la natura interconnessa delle attività spaziali, ma anche le diverse competenze e obiettivi delle organizzazioni coinvolte. È importante notare che la distinzione tra upstream e downstream a volte può essere sottile, poiché molte tecnologie e servizi spaziali hanno applicazioni e benefici sia nello spazio che sulla Terra. Ad esempio, lo sviluppo di nuove tecnologie di propulsione per i satelliti può influenzare direttamente la capacità di missione e la durata operativa nello spazio, mentre al contempo migliora la precisione e l'affidabilità dei servizi di comunicazione satellitare per gli utenti terrestri. Questa interconnessione tra upstream e downstream non solo promuove l'innovazione tecnologica, ma crea anche sinergie tra diverse industrie e settori dell'economia globale. L'uso condiviso di risorse spaziali e di dati, unito a un approccio collaborativo tra agenzie spaziali, industrie private e enti di ricerca, favorisce lo sviluppo di nuove applicazioni e soluzioni che migliorano la qualità della vita sulla Terra e promuovono una crescita economica sostenibile.

1.1.2. Trend e applicazioni

Le tecnologie dello spazio, opportunamente combinate con le più avanzate tecnologie digitali abilitanti, rappresentano il trend tecnologico e di business che più di tutti caratterizzerà la possibilità per molte imprese, in svariati settori, di accrescere la propria competitività su scala globale attraverso l'innovazione a tutti i livelli, dal prodotto/servizio ai processi, sino al modello di business complessivo.

Le tendenze della space economy riflettono gli sviluppi e le trasformazioni in corso nel settore spaziale, coinvolgendo una vasta gamma di attività commerciali e industriali legate allo spazio. Questo settore, in continua evoluzione, è caratterizzato da diversi trend principali che stanno plasmando il futuro dell'esplorazione e dell'utilizzo dello spazio. Uno dei trend più rilevanti è l'esplorazione e la colonizzazione spaziale. Aziende come SpaceX e Blue Origin stanno lavorando intensamente su tecnologie innovative per rendere il viaggio nello spazio più conveniente e accessibile. Questi sforzi mirano a creare nuove opportunità di sviluppo e insediamento nello spazio, avvicinando sempre di più la possibilità di colonizzare altri pianeti e rendendo le missioni spaziali un'opzione praticabile non solo per i governi ma anche per le iniziative private (Bank of America Merrill Lynch, 2017). Le telecomunicazioni satellitari rappresentano un altro ambito cruciale della space economy. I satelliti sono utilizzati per fornire servizi di telecomunicazione globali, tra cui la trasmissione di segnali televisivi, telefonici e Internet. Un trend emergente in questo settore è la realizzazione di costellazioni di satelliti in orbita bassa, volte a fornire connettività Internet globale. Questo sviluppo mira a garantire accesso a Internet ad alta velocità e a basso costo in regioni remote e sottosviluppate, creando nuove opportunità per il commercio, l'istruzione e lo sviluppo economico. Inoltre, si sta lavorando per garantire connessioni ad alta velocità in mare e in aria, ampliando ulteriormente le possibilità di comunicazione globale. L'osservazione della Terra da satellite è un altro trend in crescita, grazie alla crescente disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione. Questi dati sono fondamentali per una vasta gamma di applicazioni, tra cui il monitoraggio ambientale, la gestione delle risorse naturali, le previsioni meteorologiche, il controllo agricolo e il monitoraggio delle catastrofi naturali. L'innovazione in questo settore sta alimentando significativi progressi nei campi dell'agricoltura, dell'ambiente e dell'urbanistica, offrendo strumenti avanzati per comprendere e gestire meglio il nostro pianeta. Un ulteriore ambito di grande interesse è la raccolta e l'utilizzo di risorse spaziali. L'acqua, i metalli preziosi e altre risorse presenti su asteroidi e altri corpi celesti stanno attirando l'attenzione di numerose iniziative. Questa prospettiva di sfruttamento delle risorse spaziali potrebbe rivoluzionare vari settori industriali sulla Terra, fornendo materie prime preziose e aprendo nuove frontiere per l'industria mineraria. La sicurezza e la difesa spaziale sono diventate preoccupazioni sempre più rilevanti, con il crescente numero di satelliti in orbita. Gli investimenti nella sorveglianza spaziale, nella protezione dei satelliti e nelle tecnologie antisatellite stanno diventando prioritari per garantire la sicurezza delle infrastrutture spaziali e prevenire conflitti nello spazio. Questo aspetto è cruciale per mantenere la stabilità e la sicurezza a livello globale, considerando l'importanza strategica delle risorse spaziali. I sistemi di navigazione satellitare, come il Global Positioning System (GPS), consentono di determinare con precisione la posizione e la velocità in qualsiasi punto del pianeta. Questi sistemi sono ampiamente utilizzati per la navigazione terrestre, aerea e marittima, nonché per applicazioni come il monitoraggio delle flotte e la guida automobilistica assistita. La precisione e l'affidabilità di questi sistemi li rendono indispensabili per molte attività quotidiane e industriali. L'industria aerospaziale svolge un ruolo fondamentale nello sviluppo e nella produzione di veicoli spaziali, razzi, satelliti, stazioni spaziali e altre tecnologie utilizzate nello spazio. Questi prodotti sono essenziali per scopi commerciali, scientifici e governativi, sostenendo l'espansione delle attività spaziali e contribuendo significativamente alla crescita della space economy. Infine, il turismo spaziale sta emergendo come un settore promettente, offrendo ai privati la possibilità di viaggiare nello spazio per esperienze uniche, come voli suborbitali o orbitali. Le aziende private stanno sviluppando servizi turistici spaziali, rendendo possibile per i civili vivere l'emozione di viaggiare nello spazio e contribuendo a rendere lo spazio più accessibile al grande pubblico (Bank of America Merrill Lynch, 2017).

Questi sono i principali trend che oggi plasmano la space economy. Con l'evoluzione della tecnologia e l'espansione delle attività spaziali, è prevedibile che nuove tendenze emergeranno, e il settore spaziale continuerà a crescere e a evolversi nei prossimi anni, offrendo straordinarie opportunità per l'innovazione, la collaborazione internazionale e lo sviluppo sostenibile.

1.1.3. Attori coinvolti

Si propone di attenzionare il cambiamento nel panorama delle attività spaziali nel corso delle ultime decadi. Inizialmente, tra gli anni '50 e '80, i protagonisti delle attività spaziali erano pochi e mossi perlopiù da politiche e programmi di dimensione nazionale o internazionale. Tuttavia, nel corso del tempo, l'ecosistema industriale dello spazio si è espanso in maniera significativa e il volto dell'esplorazione spaziale è cambiato radicalmente, coinvolgendo una vasta gamma di attori sia sul lato dell'offerta che della domanda. La crescente domanda di servizi satellitari per telecomunicazioni, navigazione, monitoraggio ambientale e sicurezza nazionale ha catalizzato l'espansione del settore spaziale commerciale. Allo stesso tempo, la competizione tra nazioni e aziende per il dominio nello spazio ha accelerato lo sviluppo di tecnologie avanzate e ha spinto verso nuovi obiettivi di esplorazione. Si è passati da un dominio di pochi attori governativi ad un'arena globale di governi, aziende private, istituti di ricerca e organizzazioni internazionali.

Oggi le economie dello spazio ruotano attorno ad un numero sempre crescente di attori, tra cui agenzie spaziali nazionali, aziende private, istituti di ricerca e start-up innovative. Si tratta da una parte, di tutte quelle aziende impegnate nelle attività di ricerca, sviluppo e realizzazione delle infrastrutture spaziali abilitanti (upstream), e dall'altra di quelle imprese di offerta di servizi digitali che si occupano dell'implementazione delle più avanzate combinazioni di tecnologie spaziali e digitali. Il settore governativo gioca un ruolo chiave nell'economia dello spazio come investitore, sviluppatore, proprietario, operatore, regolatore e cliente. Le agenzie spaziali nazionali, i centri di ricerca e i laboratori svolgono un ruolo importante nella ricerca e nello sviluppo spaziale, sfruttando la maggior parte dei finanziamenti pubblici. La restante parte dei finanziamenti pubblici va agli attori del privato attraverso contratti e accordi di licenza (Lyall, 2016).

Nell'affascinante panorama della space economy, si delineano una varietà di attori chiave che collaborano per espandere i confini dell'esplorazione spaziale e sfruttare le opportunità economiche offerte dallo spazio esterno. Innanzitutto, le agenzie spaziali governative rappresentano i pilastri fondamentali di questa arena. Agenzie come la NASA negli Stati Uniti, l'ESA in Europa, la ROSCOSMOS in Russia e altre, giocano un ruolo determinante nella ricerca, nello sviluppo e nell'esplorazione spaziale a livello nazionale. Gestiscono programmi spaziali ambiziosi che abbracciano missioni scientifiche, esplorative e di sviluppo tecnologico, contribuendo al progresso umano e scientifico nel cosmo. Accanto alle agenzie governative, l'industria aerospaziale, sia privata che pubblica, costituisce un motore trainante della space economy. Queste aziende si dedicano allo sviluppo, alla produzione e all'operazione di veicoli spaziali, satelliti, razzi e altre tecnologie cruciali per l'esplorazione e l'utilizzo dello spazio. Attraverso partnership con agenzie governative e clienti commerciali, l'industria aerospaziale alimenta l'innovazione tecnologica e promuove la crescita economica. Gli operatori satellitari rappresentano un'altra componente vitale dell'ecosistema spaziale. Queste aziende gestiscono reti satellitari che forniscono servizi cruciali come telecomunicazioni, osservazione della Terra, navigazione e altro ancora. Organizzano la pianificazione delle missioni, il lancio e l'operazione dei satelliti, contribuendo alla connettività globale e alla raccolta di dati fondamentali per una varietà di settori. Un fenomeno emergente nell'ecosistema è rappresentato dalle start-up spaziali, che stanno rapidamente guadagnando terreno. Queste giovani aziende sono all'avanguardia nello sviluppo di nuove tecnologie, servizi e soluzioni per affrontare sfide specifiche dello spazio. Concentrandosi su aree come il turismo spaziale, l'estrazione di risorse spaziali e l'esplorazione, le start-up spaziali portano freschezza e dinamismo al settore, alimentando l'innovazione e l'adattabilità. Gli investitori giocano un ruolo cruciale nel sostenere la crescita della space economy. Venture capital, banche, fondi di private equity e investitori privati forniscono finanziamenti vitali alle aziende spaziali e ai progetti innovativi. Questi investimenti non solo stimolano lo sviluppo di nuove tecnologie e prodotti, ma anche promuovono la competitività e l'espansione del settore spaziale globale. Da un punto di vista

accademico, università, istituti di ricerca e centri accademici svolgono un ruolo fondamentale nella conduzione della ricerca scientifica e tecnologica nello spazio. Attraverso studi su esplorazione spaziale, scienze planetarie, ingegneria aerospaziale e altre discipline, la ricerca accademica contribuisce alla comprensione e all'innovazione continuativa nel settore spaziale. Non meno importante sono i regolatori e i legislatori che stabiliscono le normative e le politiche per la gestione e la regolamentazione delle attività spaziali. Questi organismi governativi si occupano di garantire la sicurezza, la sostenibilità e la conformità legale nel settore spaziale, creando un ambiente regolatorio che favorisce lo sviluppo responsabile e l'uso pacifico dello spazio.

Questa sezione rappresenta un'introduzione preliminare ai principali attori coinvolti nel dinamico settore della space economy, la cui analisi sarà approfondita nel corso di questa tesi. Nel corso delle prossime pagine, avremo l'opportunità di esplorare più a fondo le dinamiche, le prospettive e le sfide che caratterizzano ciascuno di essi. Ci concentreremo sul comprendere più a fondo le loro posizioni, attraverso le loro prospettive, le criticità da loro evidenziate e le sfide affrontate quotidianamente nel loro ambito di operatività. L'obiettivo è quello di gettare luce su questioni cruciali, dallo sviluppo tecnologico all'innovazione commerciale, dalla sostenibilità ambientale alla regolamentazione internazionale, esplorando come tali sfide possano influenzare e plasmare il futuro dello spazio come risorsa condivisa. In conclusione, questa fase iniziale di esplorazione e analisi dei principali stakeholder segna l'inizio di un'indagine accademica che mira a contribuire alla comprensione e alla valorizzazione delle dinamiche economiche e sociali relative allo spazio e ai suoi principali interpreti.

1.1.4. Storia

Dagli albori dell'era spaziale con il lancio del satellite Sputnik nel 1957, fino agli sbalzi in avanti verso la Luna negli anni '60 e '70, l'interesse umano per lo spazio è stato costantemente alimentato da una curiosità insaziabile e dalla ricerca di nuove frontiere. La space economy ha avuto le sue radici nelle prime attività spaziali degli anni '50 e '60 del XX secolo, periodo in cui gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica si impegnarono in una corsa allo spazio che portò alla messa in orbita dei primi satelliti artificiali, al lancio del primo uomo nello spazio e, infine, allo sbarco sulla Luna. Questi sforzi, guidati principalmente da obiettivi politici e militari, diedero il via a un'era di esplorazione spaziale che avrebbe avuto un impatto duraturo sull'economia globale. Durante la Guerra Fredda, la competizione tra le due superpotenze fu il catalizzatore principale per lo sviluppo delle tecnologie spaziali. Gli enormi investimenti nella ricerca e nello sviluppo permisero la realizzazione di missioni storiche, come quella dell'Apollo 11 nel 1969, che vide Neil Armstrong e Buzz Aldrin posare il piede sulla superficie lunare. Questi traguardi epocali non solo dimostrarono le capacità tecnologiche delle nazioni coinvolte, ma aprirono la strada a una serie di applicazioni commerciali e scientifiche che avrebbero plasmato il futuro della space economy (Lyall, 2016). Tuttavia, il mondo del venture capital era storicamente restio a investire nel settore dell'industria spaziale, principalmente a causa dei requisiti elevati di capitale associati a un livello di rischio significativo e del predominio delle iniziative governative. La fine della Guerra Fredda segnò un periodo di transizione per l'industria spaziale. Le riduzioni dei budget delle agenzie spaziali e i due incidenti mortali dello Shuttle Challenger nel 1986 e dello Shuttle Columbia nel 2003 contribuirono a un temporaneo affievolirsi delle speranze e delle energie dedicate al settore. Inoltre, il fallimento di vari progetti accentuò la percezione del rischio elevato associato agli investimenti spaziali, scoraggiando ulteriormente i capitali privati. Nel volgere del nuovo millennio, tuttavia, la situazione iniziò a mutare significativamente. Una nuova generazione di imprenditori, tra cui Jeff Bezos ed Elon Musk, portò il proprio successo nell'economia digitale verso il settore spaziale, fondando aziende di grande rilievo come Blue Origin e SpaceX. Queste imprese introdussero innovazioni radicali

nei metodi di design e produzione, finanziandosi attraverso il venture capital e riuscendo a ridurre i costi sia dell'hardware spaziale che dei lanci orbitali. SpaceX, in particolare, rivoluzionò il settore con l'introduzione di razzi riutilizzabili, abbattendo drasticamente i costi di accesso allo spazio e rendendo le missioni spaziali più economicamente sostenibili. Questo rinnovato interesse per l'industria spaziale fu ulteriormente alimentato dalla continua riduzione dei costi, favorendo un clima di crescente competitività internazionale e un'enfasi sull'innovazione e la scalabilità. Le attività spaziali divennero centrali per una vasta gamma di settori industriali e commerciali, tra cui le telecomunicazioni, la meteorologia, l'agricoltura, la navigazione, l'energia e la difesa. I satelliti, ad esempio, divennero fondamentali per le telecomunicazioni globali, permettendo la trasmissione di segnali televisivi, telefonici e Internet su scala mondiale. Inoltre, l'osservazione della Terra tramite satelliti iniziò a fornire dati cruciali per il monitoraggio ambientale, la gestione delle risorse naturali e la previsione delle catastrofi naturali (OECD Publishing, Organisation for Economic Co-operation and Development Staff, 2012). L'interesse per la raccolta e l'utilizzo di risorse spaziali, come l'acqua e i metalli preziosi presenti su asteroidi e altri corpi celesti, aprì nuove prospettive per l'industria mineraria e altre applicazioni commerciali. La sicurezza e la difesa spaziale divennero preoccupazioni sempre più rilevanti, con investimenti significativi nella sorveglianza spaziale, nella protezione dei satelliti e nello sviluppo di tecnologie antisatellite (Bank of America Merrill Lynch, 2017). Nel contesto di questa evoluzione, anche il turismo spaziale emerse come un settore promettente. Aziende private iniziarono a offrire voli suborbitali e orbitali per turisti, rendendo possibile per i civili vivere l'emozione del viaggio nello spazio. Questo sviluppo non solo aprì nuove opportunità economiche, ma contribuì anche a rendere lo spazio più accessibile al grande pubblico.

Questo paragrafo sintetizza l'evoluzione storica della space economy fino alla situazione attuale, evidenziando i miglioramenti nel tempo, i cambiamenti significativi e le prospettive future di trasformazione. L'evoluzione storica della space economy, dalle sue origini durante la Guerra Fredda fino agli sviluppi contemporanei, evidenzia un percorso di crescita e trasformazione straordinario. Dai primi lanci spaziali fino alle missioni interplanetarie e alla cooperazione internazionale moderna, si è assistito a un costante miglioramento delle capacità umane nello spazio in un periodo caratterizzato anche da cambiamenti nelle dinamiche economiche e geopolitiche. Questo contesto storico e predittivo offre una base solida per comprendere le motivazioni dietro alcune scelte o dinamiche che caratterizzano la space economy odierna. Una valutazione critica delle lezioni apprese dal passato e delle sfide proiettate per il futuro aumenta la consapevolezza circa le opportunità e le sfide che il settore spaziale continuerà a presentare nel prossimo decennio e oltre.

1.2. Sostenibilità

1.2.1. Economia sostenibile

Se da un lato le attività spaziali hanno il potenziale di apportare significativi benefici ambientali, è imperativo riconoscere che lo sviluppo dell'economia dello spazio deve essere intrapreso in maniera sostenibile. Le tecnologie e le iniziative spaziali, come i satelliti per il monitoraggio ambientale, contribuiscono alla raccolta di dati cruciali per la comprensione e la gestione dei cambiamenti climatici, il monitoraggio della deforestazione, il controllo dell'inquinamento e la gestione delle risorse naturali. Attraverso l'osservazione della Terra dallo spazio, è possibile ottenere informazioni dettagliate e in tempo reale che supportano la protezione dell'ambiente e la promozione di pratiche sostenibili a livello globale. Il settore spaziale offre così una vasta gamma di opportunità e si configura, quindi, come uno dei pilastri fondamentali per il progresso umano e tecnologico. Tuttavia, l'espansione delle attività economiche nello spazio presenta una serie di sfide e responsabilità che devono essere attentamente considerate, in particolare nello sfruttamento dello spazio con modalità che consentano un'evoluzione sostenibile ed efficiente. La sostenibilità nello spazio viene definita dal Comitato delle Nazioni Unite per gli Usi Pacifici dello Spazio Esterno (UN COPUOS) come la capacità di mantenere le attività spaziali nel tempo e realizzare gli obiettivi di accesso equo ai benefici dell'esplorazione e dell'uso dello spazio esterno per scopi pacifici, garantendo al contempo la preservazione dell'ambiente spaziale per le generazioni future. Questa definizione mette l'accento su un accesso equo per le generazioni presenti e future, e include una dimensione geografica, sociale e intergenerazionale. A tal proposito, è necessario sviluppare regole e istituzioni efficaci che stabiliscano degli standard per governare l'uso delle risorse spaziali e mitigare gli impatti negativi delle attività spaziali. Questo include la gestione dei detriti spaziali e la ricerca di politiche e tecnologie per preservare l'ambiente spaziale per le generazioni future. In questo senso, le tecnologie digitali hanno contribuito a ridurre i costi di lancio e a liberare tutto il potenziale dei dati generati dallo spazio, attirando investimenti nel settore e aumentando la dipendenza dalle infrastrutture spaziali.

All'interno dell'elaborato, dunque, si esplorano diverse questioni legate alla sostenibilità nello spazio, con un focus particolare sull'economia dei detriti spaziali. Si esaminano le sfide chiave, gli impatti socioeconomici e le potenziali risposte politiche, fornendo raccomandazioni specifiche per il settore spaziale. Oggi, le imprese spaziali stanno investendo in innovazioni tecnologiche per migliorare la sostenibilità delle attività spaziali. Ciò include lo sviluppo di propulsori più efficienti, l'uso di materiali leggeri e riciclabili per la costruzione di satelliti e razzi, e l'adozione di pratiche energetiche più pulite per le missioni spaziali (eai.enea.it, s.d.). Tra le innovazioni tecnologiche rilevanti vi sono i dispositivi di decommissioning, installati sui satelliti prima del lancio, che garantiscono una rimozione rapida e sicura dall'orbita a fine vita del satellite. Inoltre, le infrastrutture logistiche spaziali permanenti stanno diventando sempre più importanti, consentendo il trasferimento dei satelliti e di altri veicoli spaziali da orbite di parcheggio alle orbite operative, offrendo servizi di riparazione e rifornimento per i satelliti già in orbita, e facilitando la rimozione attiva dei detriti a fine missione. Un'altra innovazione significativa è l'utilizzo di materiali a bassa temperatura di fusione, impiegati da aziende come Picosats, che garantiscono che i satelliti si disintegrino completamente durante il rientro atmosferico, riducendo così la formazione di detriti. La gestione del traffico spaziale basata su Intelligenza Artificiale rappresenta un ulteriore progresso tecnologico cruciale. Imprese come ARCA Dynamics offrono servizi avanzati per la gestione del traffico spaziale, mentre Aviosonic Space Tech sviluppa sistemi di allerta automatica per evitare collisioni e frammentazioni in orbita. Queste tecnologie sono fondamentali per garantire un uso sicuro e sostenibile dello spazio, prevenendo la proliferazione di detriti spaziali che potrebbero compromettere le future missioni. Nel contesto della sostenibilità spaziale, le raccomandazioni politiche emergenti sottolineano la necessità di un quadro giuridico chiaro e dinamico, capace di

adattarsi ai rapidi avanzamenti tecnologici e alle nuove sfide. La sicurezza e la prevenzione della militarizzazione dello spazio sono priorità imprescindibili, richiedendo nuovi trattati che integrino e rafforzino il Trattato sullo Spazio Esterno, vietando il posizionamento di armi di distruzione di massa e promuovendo attività pacifiche. Allo stesso tempo, è fondamentale sviluppare quadri normativi che incentivino l'innovazione senza compromettere la sicurezza e l'etica, affrontando l'uso crescente di intelligenza artificiale e robotica nelle operazioni spaziali (Stanley, 2019). Incoraggiare partenariati pubblico-privati è un altro aspetto cruciale, poiché la collaborazione tra governi e aziende private può combinare la supervisione pubblica con il dinamismo del settore privato, avanzando l'esplorazione e la commercializzazione dello spazio. Tali collaborazioni sono essenziali per sviluppare infrastrutture spaziali sostenibili e condividere i rischi associati alle nuove tecnologie e missioni spaziali. Infine, la sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali deve essere una priorità, con misure per mitigare i detriti spaziali, proteggere i corpi celesti dalla contaminazione e garantire che le attività spaziali non danneggino l'ambiente terrestre. Le questioni etiche legate alla colonizzazione spaziale e alla protezione delle forme di vita extraterrestri potrebbero diventare parte integrante del diritto spaziale, contribuendo a una governance spaziale completa e inclusiva di tutti gli stakeholder

1.2.1. Parallelismo con Beni Comuni

La sostenibilità si traduce anche nella gestione responsabile di risorse spaziali, come l'orbita terrestre e lo spettro elettromagnetico, considerate risorse naturali limitate. Tali risorse sono comunemente classificate come "beni comuni". Questa categorizzazione deriva da due caratteristiche principali: un basso livello di escludibilità e un'alta sottrattività d'uso. Il basso livello di escludibilità indica che è difficile, se non impossibile, impedire a individui o gruppi di accedere e utilizzare queste risorse. L'alta sottrattività d'uso, invece, implica che l'uso da parte di un individuo riduce la quantità disponibile per altri. Queste proprietà peculiari possono portare a problematiche rilevanti, quali il sovrasfruttamento e l'inquinamento delle risorse comuni. Il fenomeno del sovrasfruttamento si verifica quando una risorsa viene utilizzata a un tasso superiore rispetto alla sua capacità di rigenerazione. Questo uso eccessivo è spesso incentivato dal fatto che ogni individuo, agendo nel proprio interesse personale, tende a sfruttare la risorsa il più possibile prima che essa venga esaurita dagli altri. In tal modo, si crea una situazione in cui il beneficio immediato dell'uso della risorsa è percepito come più importante rispetto alla conservazione a lungo termine della stessa. Parallelamente, l'inquinamento rappresenta un'altra conseguenza critica dell'uso indiscriminato dei beni comuni. Quando più individui o entità utilizzano una risorsa comune, senza una regolamentazione efficace, possono introdurre sostanze nocive nell'ambiente, compromettendo la qualità e la fruibilità della risorsa stessa per tutti gli utenti presenti e futuri (Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective, 2020).

Queste dinamiche portano al noto fenomeno della "tragedia dei beni comuni". Questo concetto, introdotto dall'ecologo Garrett Hardin nel 1968, descrive una situazione in cui le azioni individuali, motivate da interessi a breve termine, finiscono per danneggiare il benessere collettivo a lungo termine. Ogni utilizzatore della risorsa comune tende a massimizzare il proprio vantaggio immediato, ignorando l'impatto cumulativo delle loro azioni. Questo comportamento collettivo porta, inevitabilmente, alla degradazione e all'esaurimento della risorsa stessa. In assenza di regolamentazioni o accordi cooperativi, la "tragedia dei beni comuni" rappresenta una sfida significativa per la gestione sostenibile delle risorse naturali. Le soluzioni a questo problema possono includere l'implementazione di diritti di proprietà ben definiti, la regolamentazione statale, o l'adozione di strategie di gestione collettiva basate sulla cooperazione tra i diversi attori coinvolti. Senza interventi efficaci, il rischio è che le risorse comuni vengano sfruttate al punto di non poter più sostenere gli ecosistemi e le comunità che vi dipendono.

1.3. La Posizione dell'Italia

L'Italia è uno dei pochi paesi al mondo a vantare un budget per lo spazio di oltre un miliardo di dollari. Con un contributo di 2,3 miliardi di euro, l'Italia è il terzo finanziatore dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), superata solo da Francia e Germania. L'investimento riflette l'impegno dell'Italia nel settore spaziale, che si estende lungo l'intera filiera, dalla fase di accesso allo spazio alla produzione manifatturiera, dai servizi per i consumatori alla ricerca accademica e universitaria. Le principali attività spaziali sono distribuite in tutto il territorio nazionale, con una maggiore concentrazione nel Lazio, in Lombardia, in Piemonte, in Campania e in Puglia. Questo tessuto industriale è composto da grandi attori presenti sui mercati internazionali e si è arricchito negli ultimi anni con il contributo di piccole e medie imprese, inclusi start-up e spin-off, che rappresentano un eccellente potenziale per la crescita. Si compone, così, una complessa rete di aziende e organizzazioni, strutturata in distretti tecnologici e centri di competenza dell'aerospazio. I distretti funzionano come strumenti di coordinamento, consultazione e riferimento, raccogliendo in modo sinergico le migliori esperienze e competenze esistenti sul territorio. Secondo il documento elaborato dal Ministero dello Sviluppo Economico, intitolato "L'industria italiana dello spazio. Ieri, oggi e domani", nel settore operano circa 200 aziende con un fatturato annuo di circa 2 miliardi di euro (Prefazione "L'industria italiana dello Spazio. Ieri, oggi e domani").

Dal catalogo pubblicato e aggiornato annualmente dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) sulla filiera industriale, che collabora con i progetti dell'agenzia e comprende start-up, PMI e grandi aziende, emerge che circa l'80% del comparto spaziale italiano è composto da piccole e medie imprese altamente specializzate. Queste PMI operano in diversi ambiti, che vanno dai componenti elettronici all'avionica, dall'assemblaggio delle strutture alla creazione di materiali ad hoc, fino alla produzione di componenti ingegneristiche e strumentazione ad alta precisione. Complessivamente, più di 200.000 addetti sono impiegati nella filiera spaziale italiana, di cui circa 50.000 sono specializzati.

Il settore spaziale italiano è anche caratterizzato dalla presenza di diversi big player e grandi imprese riconosciute a livello internazionale, che costituiscono circa il 17% del totale delle aziende del comparto. Queste grandi imprese sviluppano la loro attività in vari ambiti della filiera, principalmente nelle telecomunicazioni e nel settore satellitare. Tra le principali aziende si trovano Leonardo SpA, una delle prime dieci aziende mondiali ad alta tecnologia operante nei settori dell'aerospazio, difesa e sicurezza. Leonardo SpA ha iniziato le sue attività spaziali a metà degli anni '60, partecipando ai primi programmi europei e progettando e producendo strumentazione come sistemi ottici, pannelli fotovoltaici, sistemi di controllo e dispositivi robotici. Negli ultimi anni, Leonardo ha collaborato alle più importanti missioni spaziali europee, quali Rosetta, ExoMars, Galileo, Copernicus, Cosmo-SkyMed e MeteoSat. Al secondo posto si colloca Thales Alenia Space, un'azienda italo-francese tra le più grandi in ambito aerospaziale in Italia. Altre importanti aziende del settore includono Avio Aero, Engineering Ingegneria Informatica, Telespazio, e-GEOS SpA, Avio SpA ed Exprivia SpA (Prefazione "L'industria italiana dello Spazio. Ieri, oggi e domani").

I settori chiave che hanno capitalizzato il successo dell'Italia nello spazio negli ultimi anni sono principalmente tre: l'osservazione della Terra, l'esplorazione spaziale e la ricerca tecnologica avanzata. Il programma Cosmo-SkyMed, in particolare, ha ottenuto notevoli risultati, con la seconda generazione di satelliti ora pienamente operativa. Questo programma rappresenta un esempio di come l'Italia sia in grado di sviluppare e implementare tecnologie di punta per il monitoraggio della Terra, contribuendo significativamente alla ricerca scientifica e all'innovazione ingegneristica. (NT+ Diritto, s.d.)

Nel 2016, l'Italia ha adottato un "Piano Strategico Space Economy" che prevedeva un investimento complessivo di circa 4,7 miliardi di euro, di cui circa il 50% finanziato con risorse pubbliche, sia nazionali

che regionali. Questo piano, parte del Piano Imprese e Competitività del Fondo di Sviluppo e Coesione, è stato approvato con la delibera CIPE n.52/2016 del 1° dicembre 2016, che ha assegnato una dotazione iniziale di 360 milioni di euro. Gli obiettivi principali del piano includono il posizionamento nazionale nei mercati globali della Space Economy entro il 2030, la definizione delle linee d'azione e delle risorse necessarie, e l'implementazione delle iniziative. Il Piano Strategico si articola in cinque linee programmatiche principali, in linea con le iniziative condotte a livello europeo, con l'obiettivo di massimizzare le ricadute a livello nazionale. Le cinque linee programmatiche includono (Ministero delle Imprese e del Made in Italy, s.d.):

- Telecomunicazioni satellitari (Mirror GovSatCom): potenziamento delle capacità nazionali nel settore delle telecomunicazioni satellitari.
- Supporto alla partecipazione nazionale a Galileo (Mirror Galileo): sostegno alla partecipazione italiana nel sistema di navigazione satellitare europeo Galileo.
- Infrastruttura Galileo PRS: sviluppo e implementazione dell'infrastruttura necessaria per il servizio pubblico regolamentato di Galileo.
- Supporto a Copernicus (Mirror Copernicus): sostegno alla partecipazione italiana nel programma europeo di osservazione della Terra Copernicus.
- Esplorazione spaziale e sviluppi tecnologici connessi: promozione dell'esplorazione spaziale e degli sviluppi tecnologici correlati.

Anche il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), approvato nel luglio del 2021, prevede un investimento di 1,29 miliardi di euro per tecnologie satellitari ed economia spaziale, nell'ambito della missione "Digitalizzazione, innovazione, competitività e cultura", che ha un budget complessivo di 40,73 miliardi di euro. Il PNRR riconosce lo spazio come un'attività strategica per lo sviluppo economico, sia per il potenziale impulso che può dare al progresso tecnologico, sia per il suo ruolo nella gestione delle transizioni economiche globali, come la lotta al cambiamento climatico tramite l'osservazione satellitare. A questi investimenti si aggiungono i 2 miliardi di euro approvati dal Comitato interministeriale per lo spazio (Comint).

Il ministro per l'Innovazione Tecnologica e la Transizione Digitale, Vittorio Colao, ha sottolineato che la space economy genera investimenti pari a 447 miliardi di dollari, con una crescita del settore del 4,4% nel 2020. Si prevede che il settore spaziale possa raggiungere un valore di 1 trilione di dollari nei prossimi dieci anni. Le tecnologie spaziali sono considerate un asset fondamentale per aiutare la società a mitigare gli effetti della pandemia e a colmare il gap digitale, oltre a contribuire alla sfida del cambiamento climatico.

Nonostante la rapida crescita della space economy, esistono diverse criticità e sfide che potrebbero ostacolare lo sviluppo. Due dei principali rischi riguardano la sicurezza e il capitale. La privatizzazione dello spazio ha portato al lancio di migliaia di satelliti, anche di piccole dimensioni, che sollevano preoccupazioni per il rischio di collisioni e la creazione di nuovi detriti spaziali. Questi detriti potrebbero compromettere il funzionamento dei sistemi satellitari da cui dipendono molte attività quotidiane. È quindi necessaria una regolamentazione internazionale aggiornata che consideri le nuove sfide, superando le disposizioni del Trattato sullo spazio extra-atmosferico del 1967.

2. Metodologia

2.1. Metodo Delphi

Le valutazioni e le misurazioni nell'ambito della space economy sono complesse e coinvolgono una serie di metodi e strumenti specifici, necessari per catturare la vasta gamma di attività economiche e tecnologiche che caratterizzano questo settore. La complessità deriva dalla natura multidisciplinare dell'economia spaziale, che abbraccia scienze, ingegneria, economia e politiche pubbliche. I sistemi di classificazione statistica attuali non definiscono le attività spaziali isolatamente dalle altre attività correlate e non esistono linee guida tecniche che garantiscano la comparabilità delle statistiche nel tempo e tra settori e paesi diversi. Questa lacuna metodologica porta a valutazioni dell'economia dello spazio che tendono a essere fortemente incentrate su casi studio e opinioni di esperti, piuttosto che su dati empirici robusti e standardizzati.

All'interno di questa tesi si farà uso e si approfondiranno le dinamiche del metodo Delphi. Lo scopo delle tecniche Delphi è quello di raccogliere i giudizi e le opinioni di un gruppo di esperti o stakeholder relativamente ad un determinato argomento e giungere al consenso o una convergenza di opinioni sul tema. Il metodo prevede una serie strutturata di iterazioni, di solito sotto forma di questionari inviati a più riprese ai partecipanti. Durante ciascuna delle iterazioni, i partecipanti sono chiamati a fornire le proprie opinioni, valutazioni o previsioni su un dato argomento. Le risposte vengono poi aggregate, analizzate e restituite ai partecipanti nelle iterazioni successive. Dalla seconda fase in poi, insieme al questionario, i partecipanti ricevono anche un feedback statistico sui risultati della fase precedente. In questo modo, hanno la possibilità di rivalutare i loro giudizi e modificare le valutazioni, se necessario. Ciò consente ai partecipanti di richiamare informazioni che avevano precedentemente trascurato o documentarsi ulteriormente ed attingere ad informazioni di nuova fonte. Questa tipologia di procedura espande, alla fine, la base di conoscenza e consente una valutazione migliore o più affidabile della questione rispetto all'uso di un solo questionario. Si osserva come, ad ogni fase aggiuntiva, si ottengano progressivamente meno valori anomali e meno commenti aperti e il consenso vada, via via consolidandosi. Questo non implica che tutti i partecipanti offrano lo stesso giudizio, ma piuttosto si giunga al livello massimo di convergenza nelle valutazioni attraverso il confronto e il raffinamento delle opinioni dei partecipanti nel corso delle iterazioni.

Di seguito verranno elencati i principali vantaggi e svantaggi del metodo.

Vantaggi (Helmer, 1967):

- Anonimato: poiché i partecipanti forniscono le loro opinioni in forma anonima, possono sentirsi più liberi di esprimere opinioni franche e non influenzate da pressioni esterne o pregiudizi personali. Questo favorisce la sincerità e l'onestà nelle risposte.
- Diversificazione nelle opinioni: il metodo Delphi coinvolge una varietà di esperti o stakeholder provenienti da diverse aree di competenza e consente, di conseguenza, di ottenere una visione completa e diversificata del problema in esame. Questa diversità di prospettive contribuisce a una valutazione più equilibrata della situazione.
- Iterativo: le iterazioni multiple del processo Delphi consentono un raffinamento progressivo delle opinioni nel tempo. Attraverso il feedback e le discussioni successive, i partecipanti hanno l'opportunità di rivedere e aggiornare le proprie opinioni, migliorando così la qualità complessiva delle risposte.
- Eliminazione bias: il metodo Delphi riduce il rischio di influenze di gruppo o di personalità che potrebbero verificarsi in situazioni di confronto diretto. Tutti i partecipanti hanno la possibilità di esprimere le proprie opinioni senza essere influenzati dalle opinioni degli altri.

- Flessibilità: il metodo Delphi può essere utilizzato in una vasta gamma di contesti e su argomenti diversi, dalla previsione delle tendenze di mercato alla formulazione di politiche pubbliche. Questa flessibilità lo rende adatto ad una molteplicità di applicazioni.

Svantaggi (Linstone, 2002):

- Costo temporale: il metodo Delphi può richiedere tanto tempo per via delle molteplici iterazioni e della necessità di coordinare i partecipanti. Questo può prolungare il processo decisionale e aumentare i costi associati alla raccolta e all'analisi dei dati.
- Difficoltà nell'interpretare il consenso: l'interpretazione dei risultati del metodo Delphi può essere complessa, specialmente quando il consenso non è chiaro o quando emergono opinioni contrastanti. È possibile che alcuni partecipanti non siano chiari nella loro espressione o che ci siano discrepanze nelle risposte raccolte.
- Rischio di perdita di interesse: con il passare del tempo e il susseguirsi delle iterazioni, i partecipanti potrebbero perdere interesse o impegnarsi in modo minore nelle fasi successive del processo Delphi. Ciò potrebbe ridurre la qualità delle risposte e compromettere i risultati finali.
- Possibile polarizzazione: esiste il rischio che le opinioni estreme o di minoranza non vengano adeguatamente considerate nel processo Delphi. Inoltre, alcuni partecipanti potrebbero sentirsi influenzati a conformarsi alle opinioni più diffuse o dominanti, riducendo così la diversità delle prospettive considerate.
- Dipendenza dalla selezione dei partecipanti: la qualità e l'efficacia del metodo Delphi dipendono dalla selezione dei partecipanti e dalla loro competenza nel campo specifico in esame. Se i partecipanti non fossero adeguatamente qualificati o rappresentativi del settore, ciò potrebbe influenzare i risultati finali e compromettere la validità del processo.

Lo scopo di uno studio di questo tipo è integrare tutti i gruppi e le prospettive rilevanti per un argomento di ricerca, nel modo più bilanciato possibile al fine di ridurre l'incertezza e il rischio associati ad ambiti in cui la conoscenza è frammentata o controversa. Si includono le prospettive di scienziati, specialisti ed esperti e in alcuni casi è raccomandato che lo studio miri a raggiungere un giusto equilibrio tra genere, età, posizione e affiliazione istituzionale dei partecipanti.

2.2. Descrizione Database e Questionario

2.2.1. Descrizione Database

L'analisi proposta nell'elaborato è stata condotta a partire da un database di 2375 aziende, selezionate da un database Dealroom fornitomi dalla Dottoressa Valente e dislocate per tutto il mondo, in modo tale da offrire un quadro variegato e rappresentativo del panorama imprenditoriale internazionale. Tuttavia, al fine di assicurare la validità e la pertinenza dei dati raccolti, è stato necessario concentrarsi esclusivamente sulle aziende che hanno fornito informazioni complete e verificabili riguardo ai loro fondatori. Questo criterio ha portato a un numero finale di 1057 aziende selezionate per l'analisi approfondita. All'interno di questo campione, sono stati identificati i nominativi di un totale di 1435 fondatori. Questi dati, unitamente alle ricerche precedentemente condotte da due colleghi laureandi, hanno consentito di costruire un pool di esperti composto da 1920 individui che costituiscono, di fatto, il pool di esperti ai quali si è voluto sottoporre l'indagine. Dei 1920 esperti cui è stato inviato il questionario, solo 63 hanno manifestato la disponibilità a collaborare. Su questo gruppo selezionato di 63 individui è stata condotta un'analisi mirata a ottenere una comprensione più precisa del contesto professionale e personale in cui operano. Tale analisi è stata fondamentale per garantire che le interpretazioni delle loro risposte fossero accurate e contestualizzate. Agli esperti è stato chiesto di compilare un modulo in cui dovevano fornire informazioni relative al loro genere, età, provenienza geografica, livello di istruzione, esperienza professionale e altri fattori rilevanti. Questi dati sono stati raccolti con l'intento di creare un profilo demografico e professionale completo dei partecipanti, permettendo di estrarre statistiche significative da utilizzare nell'analisi. L'analisi statistica delle caratteristiche demografiche e professionali dei rispondenti ha costituito una fase cruciale della ricerca, consentendo di contestualizzare meglio le opinioni e le valutazioni espresse nei questionari. La comprensione delle diverse sfumature demografiche, come la distribuzione di genere e l'età media, così come la diversità geografica e i livelli di esperienza professionale, ha permesso di attribuire alle risposte una dimensione più ricca e sfaccettata. Questo ha facilitato una interpretazione più rigorosa e informata delle opinioni degli esperti, assicurando che le conclusioni tratte fossero ben fondate e riflettessero accuratamente la varietà di prospettive all'interno del gruppo di rispondenti.

Genere	Numero Esperti
Donna	35%
Uomo	62%
Non rilevante	1,5%
Non specificato	1,5%
Totale complessivo	63

Figura 1: Numero esperti per Genere

La distribuzione di genere tra gli esperti intervistati nell'ambito della nostra indagine rivela una predominanza maschile, con gli uomini che rappresentano circa il 62% del totale e le donne che costituiscono il restante 35%. Questa tendenza è indicativa di una rappresentazione di genere più ampia all'interno delle industrie STEM (Scienza, Tecnologia, Ingegneria e Matematica), un settore che comprende anche la space economy. La disparità di genere in queste discipline è stata oggetto di numerosi studi e ricerche, che evidenziano una sottorappresentazione delle donne. Secondo un rapporto dell'American Institute of Physics, le donne costituiscono solo circa il 20% della forza lavoro nelle discipline STEM, una statistica che riflette fedelmente anche la situazione nel settore spaziale (Research and Development, s.d.).

Questo squilibrio di genere può avere implicazioni significative per l'analisi e l'interpretazione dei dati raccolti. In primo luogo, la sottorappresentazione delle donne tra gli esperti intervistati potrebbe influenzare la gamma di opinioni e approcci presenti nei dibattiti sull'economia spaziale, restringendo la varietà di punti di vista e soluzioni considerate. Questo aspetto è particolarmente rilevante in un campo come la space economy, dove la diversità di pensiero è cruciale per affrontare le complesse sfide tecniche e normative che emergono. Inoltre, la predominanza maschile tra gli esperti intervistati può riflettere dinamiche di inclusione e accessibilità nelle carriere STEM. La presenza relativamente bassa delle donne in questi settori può essere attribuita a una serie di fattori, tra cui barriere strutturali, pregiudizi di genere e mancanza di modelli di ruolo femminili. Questi ostacoli non solo limitano le opportunità per le donne di entrare e prosperare nei campi STEM, ma possono anche influenzare la cultura e le priorità di ricerca e sviluppo all'interno del settore spaziale (American Institute of Physics).

Regione di Residenza	Numero Esperti
Asia	5%
Europa	70%
Nord America	17%
Oceania	3%
Sud America	5%
Totale in numero	63

Figura 2: Numero esperti per Area Geografica

Dei 63 rispondenti, 44 sono europei, 11 sono statunitensi e i rimanenti 8 provengono da altre regioni del mondo. Questa distribuzione geografica mostra una prevalenza di partecipanti europei, che costituiscono circa il 70% del totale, seguiti dagli statunitensi con circa il 17%, mentre il restante 13% rappresenta una varietà di altre provenienze. Questo dato può essere interpretato alla luce del robusto ecosistema spaziale europeo, sostenuto da organizzazioni chiave come l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e da programmi nazionali e regionali che promuovono l'innovazione e la collaborazione nel settore spaziale. L'Europa ha investito massicciamente in infrastrutture spaziali, ricerca e sviluppo, e ha incentivato la partecipazione di attori privati, creando un ambiente favorevole alla crescita economica delle imprese spaziali. Le politiche di sostegno, come i programmi Horizon 2020 e Horizon Europe, hanno giocato un ruolo cruciale nel finanziare progetti innovativi e nel facilitare la creazione di nuove start-up. Inoltre, la presenza di cluster tecnologici e di ricerca in paesi come Francia, Germania e Italia ha ulteriormente stimolato lo sviluppo di competenze avanzate e di tecnologie all'avanguardia, rendendo l'Europa un epicentro per le attività spaziali. Il Nord America, con una rappresentanza significativa ma inferiore rispetto all'Europa, si posiziona come un altro polo cruciale per i fatturati delle imprese spaziali. Gli Stati Uniti, in particolare, ospitano alcune delle più grandi e influenti aziende del settore, grazie a un ambiente imprenditoriale dinamico e a un forte supporto governativo attraverso la NASA e il Dipartimento della Difesa. Le iniziative di privatizzazione dello spazio, promosse da programmi come il Commercial Crew Program e il Lunar Gateway, hanno catalizzato l'afflusso di investimenti privati e lo sviluppo di tecnologie innovative. Ad oggi, è importante riconoscere che alcuni paesi al di fuori di Europa e Nord America stanno facendo passi significativi per sviluppare le loro capacità spaziali. Paesi come India e Cina, hanno programmi spaziali ambiziosi e stanno rapidamente ampliando la loro presenza nel settore. La Cina, con il suo programma spaziale nazionale aggressivo, e l'India, con missioni come Chandrayaan e Mangalyaan, stanno dimostrando il potenziale per emergere come nuovi attori significativi nel panorama globale della space economy (Osservatori Digital Innovation, s.d.).

Per il futuro, sarà interessante osservare come le dinamiche globali evolveranno, con potenziali aumenti degli investimenti in altre regioni e l'emergere di nuovi centri di eccellenza spaziale. Il rafforzamento delle collaborazioni internazionali e il trasferimento di tecnologie potrebbero giocare un ruolo cruciale

nel bilanciare la distribuzione geografica dei fatturati e nel favorire una crescita più inclusiva e sostenibile del settore spaziale globale.

Affiliazione	Numero Esperti
Altro	8%
Azienda	48%
Governamentale	11%
Centro di ricerca	11%
Università	22%
Totale in numero	63

Figura 3: Numero esperti per Affiliazione

Dalla raccolta dei dati, è emerso che 30 dei rispondenti sono impiegati nel settore aziendale, rappresentando così una significativa porzione del campione. Questa prevalenza del settore privato, pari a circa il 48% dei partecipanti, sottolinea il ruolo predominante delle aziende nella space economy, suggerendo che molte delle risposte ricevute potrebbero riflettere le prospettive e le esperienze di attori che operano direttamente in questo contesto dinamico e competitivo. In aggiunta, 14 rispondenti sono affiliati a istituzioni accademiche, costituendo circa il 22% del totale. La presenza significativa di accademici arricchisce l'indagine con una visione più teorica e basata sulla ricerca, fornendo un equilibrio tra l'approccio pratico e innovativo del settore privato e l'analisi critica e metodologica tipica del mondo accademico. Questo contributo è fondamentale per comprendere meglio le tendenze emergenti, le sfide scientifiche e le opportunità educative all'interno della space economy. Parallelamente, 7 esperti provengono da enti governativi, pari a circa l'11% del campione, e altri 7 lavorano in centri di ricerca, anch'essi rappresentanti l'11% dei partecipanti. Sebbene queste due categorie abbiano una rappresentanza numericamente inferiore rispetto al settore privato e accademico, il loro contributo è cruciale per una visione complessiva e bilanciata dell'indagine. Gli esperti provenienti da enti governativi apportano una prospettiva unica, particolarmente rilevante per la comprensione delle normative, della sicurezza e delle politiche pubbliche che regolano e influenzano lo sviluppo sostenibile della space economy. La loro visione è indispensabile per garantire che le attività spaziali siano condotte in conformità con gli standard internazionali e nazionali, assicurando al contempo la sicurezza delle operazioni spaziali e la protezione dell'ambiente spaziale. I professionisti dei centri di ricerca, d'altra parte, contribuiscono con una vasta gamma di competenze tecniche e scientifiche che sono essenziali per l'avanzamento delle conoscenze e delle tecnologie nel settore spaziale. La loro partecipazione fornisce una base solida di evidenze empiriche e innovazioni tecniche che supportano lo sviluppo di nuove applicazioni e soluzioni per le sfide spaziali. Questa composizione professionale diversificata del campione analizzato consente di ottenere un quadro ricco e sfaccettato delle opinioni e delle esperienze all'interno della space economy. La predominanza del settore privato suggerisce che le risposte potrebbero essere fortemente orientate verso le innovazioni tecnologiche e le opportunità di mercato. Tuttavia, la presenza significativa del mondo accademico e dei centri di ricerca, insieme al contributo degli enti governativi, garantisce che l'indagine catturi una gamma completa di prospettive, incluse quelle relative alla teoria, alla pratica, alla regolamentazione e alla sicurezza. Questo approccio integrato è fondamentale per sviluppare una comprensione equilibrata e approfondita delle dinamiche che caratterizzano la space economy, permettendo di trarre conclusioni ben fondate e rappresentative delle diverse voci e interessi presenti nel settore.

Anni di esperienza	Numero Esperti
Da a 11 a 15	15%
da 16 a 20	11%
Da 5 a 10	19%
Meno di 5	22%
Più di 20	33%
Totale in numero	63

Figura 4: Numero esperti per Anni di Esperienza

La distribuzione dell'esperienza tra i rispondenti del nostro studio rivela una presenza significativa di esperti con oltre 20 anni di esperienza, che rappresentano circa il 33% del totale. Questo dato è particolarmente emblematico e si allinea con la predominanza del settore privato precedentemente descritta. La forte presenza di veterani nel settore riflette una ricchezza di conoscenza e competenza accumulata nel corso di anni di impegno professionale, fornendo un contributo essenziale all'analisi delle dinamiche della space economy. Gli esperti con una lunga carriera offrono prospettive consolidate, basate su un'ampia esperienza pratica e su una profonda comprensione delle evoluzioni storiche e tecnologiche nel settore spaziale. Parallelamente, un consistente gruppo di rispondenti, costituito da 14 persone (pari al 22%), possiede meno di 5 anni di esperienza. Questa significativa rappresentanza di prospettive più giovani e recenti si correla direttamente con la forte presenza di partecipanti provenienti dal mondo accademico, come illustrato precedentemente. I giovani professionisti e gli accademici apportano un'energia innovativa e una visione fresca, spesso caratterizzate da un'approccio creativo e da una maggiore propensione all'adozione di nuove tecnologie e metodologie. La loro inclusione nell'indagine garantisce che le opinioni emergenti e le tendenze più attuali siano adeguatamente rappresentate. Le fasce di esperienza intermedia, ovvero quelle che vanno dai 5 ai 10 anni, dagli 11 ai 15 anni e dai 16 ai 20 anni, mostrano una distribuzione più uniforme, con rispettivamente il 19%, il 14% e l'11% dei rispondenti. Questa distribuzione equa tra le diverse fasce di esperienza contribuisce a una ricchezza di prospettive che spaziano da punti di vista maturi e consolidati a quelli più recenti e innovativi. Gli esperti con un'esperienza intermedia combinano una solida base di conoscenze pratiche con la capacità di adattarsi a nuovi sviluppi e cambiamenti nel settore, fornendo un equilibrio ideale tra tradizione e innovazione. Questo equilibrio è estremamente utile per una comprensione completa e sfaccettata delle tematiche analizzate. La presenza di esperti con lunga esperienza assicura che le opinioni consolidate e le strategie comprovate siano adeguatamente considerate, mentre l'inclusione di giovani professionisti garantisce che le nuove idee e le innovazioni siano integrate nel dibattito.

L'analisi delle caratteristiche demografiche e professionali dei rispondenti, combinata con la varietà delle loro esperienze, fornisce una base solida per interpretare le risposte e trarre conclusioni ben fondate. Questo approccio metodologico permette di contestualizzare meglio le opinioni espresse, garantendo che le conclusioni riflettano accuratamente la diversità delle prospettive presenti nel settore. La fusione di esperienze consolidate e nuove visioni arricchisce l'indagine, offrendo una panoramica complessa e integrata delle dinamiche che caratterizzano la space economy. In definitiva, il pool di esperti ha costituito un campione robusto e diversificato per l'indagine e la somministrazione del questionario ha permesso di raccogliere un ampio spettro di opinioni e valutazioni riguardanti le attuali condizioni economiche, sociali e ambientali, nonché le relative proiezioni future. Questo approccio ha facilitato un'analisi più attenta delle percezioni e delle aspettative degli imprenditori su scala globale. Le statistiche riportate sono fondamentali per delineare il profilo professionale delle figure coinvolte nell'indagine. I dati forniscono una visione complessiva delle caratteristiche demografiche e professionali dei rispondenti, consentendo di contestualizzare meglio le loro opinioni. Tuttavia, nella fase di analisi delle risposte, le stime perdono di tracciabilità a causa dell'anonimato garantito ai partecipanti. Questo anonimato, sebbene essenziale per assicurare la riservatezza e la

libertà di espressione dei rispondenti, limita la possibilità di approfondire ulteriormente le correlazioni tra le risposte e le specifiche esperienze professionali dei partecipanti.

2.2.2. Descrizione Questionario

Il questionario strutturato per questa indagine comprende 71 domande, suddivise in 8 domande aperte e 63 domande chiuse. Le domande a risposta chiusa sono progettate per misurare il grado di accordo dei rispondenti con le affermazioni proposte, utilizzando una scala Likert a 5 punti, dove 1 indica il minimo livello di accordo e 5 il massimo. Il modulo è organizzato in sette macrocategorie, ciascuna delle quali esplora differenti dimensioni tematiche. Per ogni categoria, si chiede ai partecipanti di fornire una valutazione attuale relativa agli ambiti economico, sociale e ambientale e in riferimento ai principali stakeholders coinvolti. Successivamente, i rispondenti sono invitati a proiettare tali valutazioni nel futuro, immaginando come potrebbero cambiare entro il 2040. Questa duplice prospettiva permette di valutare non solo l'impatto presente di ciascun tema, ma anche di stimare il suo potenziale sviluppo e le sue implicazioni future.

Per facilitare l'estrazione e l'analisi delle statistiche delle risposte al questionario, è stato adottato un sistema di codifica numerica delle risposte fornite dai partecipanti, agevolando così l'elaborazione statistica e l'interpretazione dei risultati. Il questionario somministrato ai partecipanti, come detto, includeva una serie di domande alle quali era richiesto di rispondere esprimendo il proprio livello di accordo o la propria percezione rispetto a determinate affermazioni, utilizzando una scala Likert a cinque punti. Per ciascuna domanda è stato implementato il seguente schema di codifica:

- Not at all è stato assegnato il valore numerico di 1.
- Slightly è stato assegnato il valore numerico di 2.
- Moderately è stato assegnato il valore numerico di 3.
- Very è stato assegnato il valore numerico di 4.
- Extremely è stato assegnato il valore numerico di 5.

Questa conversione delle risposte qualitative in valori numerici permette di quantificare le percezioni e gli atteggiamenti dei partecipanti in maniera oggettiva, facilitando l'applicazione di metodi statistici per l'analisi dei dati raccolti. La scala Likert a cinque punti è una delle più comunemente utilizzate nelle scienze sociali e comportamentali per misurare le opinioni e le attitudini. La trasformazione in dati numerici consente di identificare con maggiore chiarezza le tendenze e i pattern emergenti dalle risposte dei partecipanti e permette di applicare tecniche di visualizzazione dei dati, come grafici e tabelle, che aiutano a comunicare in modo efficace i risultati dell'analisi (Survey Monkey, s.d.). La validità e l'affidabilità di questa scala sono ampiamente riconosciute, rendendola uno strumento appropriato per la misurazione delle variabili latenti legate alle percezioni e agli atteggiamenti.

In fase di analisi, si è adottato un approccio selettivo per l'estrazione delle statistiche. Nello specifico, sono state considerate esclusivamente le risposte che si collocano agli estremi della scala, evitando quindi le risposte intermedie. L'obiettivo di una scelta di questo tipo è ottenere una visione più chiara e definita delle opinioni degli esperti, evitando l'ambiguità delle risposte moderate. Per l'analisi statistica, dunque, si sono selezionate solo le risposte che indicano una posizione decisa, ovvero quelle corrispondenti ai valori 1 e 2 (che indicano una percezione negativa o di scarsa intensità) e ai valori 4 e 5 (che indicano una percezione positiva o di alta intensità). Questa selezione ha permesso di focalizzarsi

sulle opinioni più forti e delineate, escludendo quelle che rappresentano una posizione neutrale o moderata. Una volta isolate, le risposte sono state confrontate tra loro e visualizzate in un grafico al fine di mettere in evidenza le tendenze predominanti e facilitare la comprensione delle opinioni più polarizzate degli esperti. Il grafico risultante offre una rappresentazione visiva delle opinioni e permette di identificare rapidamente le aree di maggiore accordo o disaccordo. In questo modo, l'approccio selettivo adottato per l'estrazione delle statistiche dalla scala Likert, limitato alle risposte non intermedie, ha permesso di ottenere una rappresentazione incisiva delle opinioni degli esperti.

Oltre all'utilizzo della scala Likert, il questionario somministra anche una serie di domande aperte, permettendo agli esperti di esprimere liberamente le loro opinioni e valutazioni. La scala Likert facilita la quantificazione delle opinioni su una serie di affermazioni predeterminate, offrendo dati strutturati e facilmente analizzabili. Tuttavia, le domande aperte forniscono un contesto qualitativo indispensabile, consentendo di raccogliere insight più dettagliati e sfumati che potrebbero sfuggire a una valutazione esclusivamente numerica. In particolare, le risposte alle domande aperte permettono di esplorare le motivazioni sottostanti le valutazioni numeriche e identificare temi che non erano stati considerati nelle domande chiuse. Questa combinazione di dati quantitativi e qualitativi migliora la robustezza dell'analisi e offre una visione più completa e integrata delle opinioni degli esperti riguardo alle regolamentazioni spaziali e alle loro implicazioni economiche, sociali e ambientali.

Nel complesso, l'approccio adottato per questa indagine mira a fornire una visione complessiva dell'impatto economico, sociale e ambientale degli argomenti trattati, nonché a identificare le possibili evoluzioni nei prossimi quindici anni. Le risposte raccolte, sebbene limitate in numero, offrono uno spaccato significativo delle percezioni e delle aspettative degli esperti interpellati. Questo metodo di indagine è particolarmente utile per comprendere come i professionisti del settore valutano le attuali condizioni e come prevedono che possano evolversi nel prossimo futuro. La raccolta e l'analisi di queste valutazioni consentono di delineare un quadro prospettico delle tendenze future, facilitando una comprensione più ampia dei possibili scenari evolutivi nel contesto dell'economia spaziale.

3. Analisi e Risultati

3.1. Space Laws and Regulations

3.1.1. Introduzione

La prima sezione del questionario si incentra sulle regolamentazioni del diritto spaziale e su come queste incentivino le imprese a intraprendere iniziative spaziali sostenibili. A tale scopo, è stato analizzato il quadro normativo esistente e sono state raccolte le opinioni degli esperti del settore circa l'efficacia di tali regolamentazioni nel promuovere pratiche sostenibili. Inoltre, il questionario ha esplorato le aspettative degli esperti sulle possibili evoluzioni delle regolamentazioni spaziali entro il 2040, cercando di comprendere in che modo il contesto normativo possa modificarsi per favorire ulteriormente lo sviluppo sostenibile nello spazio.

Le regolamentazioni del diritto spaziale comprendono le norme, i principi e gli standard che regolano le attività nello spazio extra-atmosferico e includono le linee guida per la gestione dei detriti spaziali, la protezione degli ambienti extraterrestri e l'utilizzo responsabile delle risorse naturali nello spazio. Con l'evoluzione del settore e il numero sempre crescente di attori coinvolti, la necessità di quadri giuridici e normativi completi è divenuta progressivamente più importante. Le leggi e i regolamenti spaziali, infatti, forniscono una struttura essenziale per garantire che le attività spaziali siano condotte in modo sicuro, sostenibile e conforme agli standard internazionali, creando così un ambiente favorevole all'innovazione e alla cooperazione. Le basi del diritto spaziale sono state stabilite durante l'era della Guerra Fredda, principalmente a causa della competizione geopolitica tra Stati Uniti e Unione Sovietica. Questo periodo ha visto la formulazione di accordi e convenzioni storici che hanno definito le norme fondamentali sulla gestione dei detriti spaziali, la regolamentazione delle attività commerciali nello spazio e la protezione degli ambienti celesti (Von der Dunk, 2015). Sono accordi che continuano, negli anni, a influenzare l'evoluzione del diritto spaziale. Queste norme, contenute in una serie di trattati internazionali e principi sviluppati sotto l'egida delle Nazioni Unite (ONU), includono:

- Trattato sullo Spazio Esterno (Outer Space Treaty) del 1967: questo trattato è il pilastro del diritto spaziale internazionale. Stabilisce che lo spazio extra-atmosferico, inclusa la Luna e gli altri corpi celesti, deve essere utilizzato esclusivamente per scopi pacifici. Proibisce l'installazione di armi nucleari o qualsiasi altra arma di distruzione di massa nello spazio. Inoltre, afferma che lo spazio è una "provincia dell'umanità", il che implica che deve essere accessibile a tutti i paesi e che nessuno può rivendicarne la sovranità. Costituisce, tutt'ora la pietra angolare del diritto spaziale internazionale
- Accordo sul Salvataggio (Rescue Agreement) del 1968: questo accordo stabilisce obblighi per gli stati di assistere gli astronauti in difficoltà e di restituire oggetti spaziali lanciati da altri stati se atterrano accidentalmente nel loro territorio. Questo trattato sottolinea gli aspetti umanitari dell'esplorazione spaziale, riconoscendo gli astronauti come inviati dell'umanità nello spazio esterno.
- Convenzione sulla Responsabilità (Liability Convention) del 1972: questo trattato stabilisce le regole per la responsabilità degli stati per danni causati dalle loro attività spaziali e incoraggia, in questo modo, un comportamento responsabile nell'ambito delle spedizioni spaziali. Gli stati sono ritenuti responsabili dei danni causati dai loro oggetti spaziali sulla Terra e nello spazio.
- Convenzione sul Registro (Registration Convention) del 1976: questa convenzione richiede agli stati di registrare i loro oggetti spaziali lanciati nell'orbita terrestre o oltre. Lo scopo è facilitare l'identificazione degli oggetti spaziali, promuovere la trasparenza nelle attività spaziali e prevenire eventuali conflitti o collisioni.

- Accordo sulla Luna (Moon Agreement) del 1979: questo trattato specifica che la Luna e le sue risorse naturali sono patrimonio comune dell'umanità. Stabilisce che le risorse lunari non possono essere sfruttate a livello commerciale fino a quando non verrà stabilito un regime internazionale per la loro gestione.
- Accordo sulla Luna (1984): l'accordo che regola le attività degli Stati sulla Luna e sugli altri Corpi Celesti mira a regolamentare l'esplorazione e l'uso dei corpi celesti. Sebbene non sia ampiamente adottato, propone che la Luna e le sue risorse siano patrimonio comune dell'umanità e debbano essere utilizzate per scopi pacifici e per il beneficio di tutti i paesi, indipendentemente dal loro livello di sviluppo economico o scientifico.

Oltre ai trattati principali, le Nazioni Unite hanno sviluppato una serie di principi per guidare le attività spaziali (Von der Dunk, 2015):

- Principi sulla Teledetenzione (Remote Sensing Principles) del 1986: regolano l'uso della teledetenzione satellitare, assicurando che i dati raccolti siano usati per il beneficio di tutti i paesi e siano accessibili.
- Principi sull'Utilizzo delle Fonti di Energia Nucleare nello Spazio (Nuclear Power Sources Principles) del 1992: stabiliscono norme per l'uso sicuro e responsabile delle fonti di energia nucleare nello spazio.
- Principi sulla Cooperazione Internazionale per l'Esplorazione e l'Uso dello Spazio (International Cooperation Principles) del 1996: promuovono la cooperazione internazionale per garantire che i benefici derivanti dall'esplorazione e dall'uso dello spazio siano condivisi equamente.

Uno dei temi ricorrenti riguarda, evidentemente, la sicurezza e la militarizzazione dello spazio. Lo spazio esterno, una volta considerato un ambiente prevalentemente pacifico e collaborativo per l'esplorazione scientifica e commerciale, è ora al centro di dibattiti intensi riguardo alla sua sicurezza e stabilità a lungo termine. Il Trattato sullo Spazio Esterno del 1967 ha costituito un fondamento normativo cruciale, proibendo esplicitamente il posizionamento di armi di distruzione di massa nello spazio. Tuttavia, l'evoluzione delle tecnologie spaziali e le crescenti tensioni geopolitiche suggeriscono che il trattato, da solo, potrebbe non essere sufficiente a prevenire futuri scenari di militarizzazione spaziale, rendendo urgente la stipulazione di nuovi accordi internazionali mirati a rafforzare la sicurezza e la stabilità dello spazio. Garantire che lo spazio esterno rimanga un dominio per attività pacifiche richiede un impegno concertato da parte della comunità internazionale, che dovrebbe basarsi su due pilastri fondamentali: la collaborazione pubblico-privato tra agenzie spaziali, industrie aerospaziali e altre entità interessate, e lo sviluppo di quadri normativi dinamici e aggiornati che riflettano le evoluzioni tecnologiche e geopolitiche. La collaborazione pubblico-privato è essenziale per promuovere la trasparenza, la condivisione di informazioni e l'implementazione di pratiche standardizzate per la sicurezza spaziale. Le partnership tra governi, industria e organizzazioni internazionali possono facilitare lo sviluppo di normative comuni e protocolli di comportamento che rafforzino la fiducia reciproca e mitigano il rischio di incidenti o conflitti nello spazio. Questa collaborazione potrà sfruttare i punti di forza di entrambi i settori, combinando la supervisione pubblica con il dinamismo del settore privato per avanzare l'esplorazione e la commercializzazione dello spazio. La cooperazione tra governi e aziende private può rivelarsi cruciale, allo stesso tempo, per la condivisione dei rischi associati alle nuove tecnologie e missioni spaziali e un conseguente uso equo ed inclusivo dello spazio esterno. Parallelamente, lo sviluppo di quadri normativi dinamici e proattivi è cruciale per adattare la regolamentazione spaziale alle mutevoli realtà geopolitiche e tecnologiche. Con l'emergere di nuove tecnologie e modelli di business, le normative devono potersi adattare alle circostanze mutevoli senza soffocare l'innovazione,

garantendo allo stesso tempo che le nuove metodologie siano utilizzate in modo sicuro, etico e sostenibile (Stanley, 2019).

Un altro punto essenziale è il focus sulla sostenibilità. Dare priorità alla sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali è fondamentale per preservare l'ambiente spaziale per le future generazioni. Ciò include misure per mitigare i detriti spaziali, proteggere i corpi celesti dalla contaminazione e garantire che le attività spaziali non danneggino l'ambiente terrestre. In questo senso, le questioni etiche legate alla colonizzazione spaziale, alla bioingegneria e alla protezione delle forme di vita extraterrestri, se esistenti, potrebbero diventare parte integrante del diritto spaziale. Con l'aumento delle missioni con equipaggio e dei potenziali insediamenti nello spazio, inoltre, emergono ulteriori necessità normative. Si necessitano nuove regolamentazioni per proteggere i diritti degli astronauti, inclusi i diritti lavorativi e di sicurezza. Inoltre, potrebbero emergere regolamentazioni specifiche per la costruzione e la gestione di infrastrutture orbitali, come stazioni spaziali commerciali e fabbriche in orbita. La regolamentazione del turismo spaziale rappresenta un ulteriore ambito di sviluppo, con la necessità di affrontare questioni relative alla sicurezza dei passeggeri, alle responsabilità legali in caso di incidenti e alla gestione dei rischi associati ai voli spaziali commerciali.

Dopo aver esaminato i trattati fondamentali che regolano le attività spaziali, è essenziale considerare anche gli enti nazionali e internazionali che giocano un ruolo cruciale nell'implementazione e nello sviluppo dei temi menzionati e del diritto spaziale in generale. Il settore è sorvegliato da una serie di enti nazionali e internazionali che collaborano per stabilire e applicare normative volte a garantire la sicurezza, la sostenibilità e l'uso pacifico dello spazio. A livello nazionale, le autorità regolatorie svolgono un ruolo fondamentale nella supervisione delle attività spaziali commerciali e nella tutela degli interessi nazionali. Negli Stati Uniti, ad esempio, la Federal Aviation Administration (FAA) non solo regola l'aviazione civile, ma sovrintende anche alle licenze per i lanci spaziali commerciali e monitora la conformità con rigorosi standard di sicurezza e ambientali. Questo garantisce che le operazioni spaziali negli Stati Uniti siano gestite in conformità con le leggi nazionali e internazionali, promuovendo la sicurezza pubblica e la protezione dell'ambiente. Parallelamente, le principali agenzie spaziali nazionali come la NASA negli Stati Uniti, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e la China National Space Administration (CNSA) in Cina, giocano un ruolo cruciale nella regolamentazione e nello sviluppo delle politiche spaziali nazionali. Queste agenzie non solo guidano la ricerca scientifica e l'esplorazione spaziale, ma stabiliscono anche standard tecnici e operativi per garantire la sicurezza delle missioni spaziali e la protezione degli interessi nazionali nello spazio. La loro expertise è fondamentale per lo sviluppo di tecnologie avanzate e per il mantenimento di un ambiente spaziale sicuro e sostenibile. A livello internazionale, le Nazioni Unite svolgono un ruolo chiave attraverso il Comitato per l'Utilizzazione Pacifica dello Spazio Extra-atmosferico (COPUOS) e l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari Spaziali (UNOOSA). Queste entità forniscono una piattaforma cruciale per la cooperazione internazionale nel campo dello spazio, facilitando il dialogo tra gli Stati membri e promuovendo l'adozione di normative globali per l'uso pacifico e responsabile dello spazio esterno. Il COPUOS coordina gli sforzi internazionali per affrontare le questioni spaziali emergenti, come la gestione dei rifiuti spaziali e la regolamentazione delle attività minerarie nello spazio, garantendo che gli interessi di tutti gli Stati siano rappresentati e tutelati.

3.1.2. Analisi

Come visto, le regolamentazioni del diritto spaziale attualmente in vigore comprendono una serie di misure progettate per promuovere la sostenibilità nelle attività spaziali. Attraverso il questionario, si è cercato di valutarne l'impatto sulle aziende, verificando se e in che modo queste norme influenzano le strategie delle imprese nello sviluppo di tecnologie e missioni che minimizzino l'impatto ambientale e promuovano la sostenibilità a lungo termine. Il questionario ha esplorato le aspettative degli esperti riguardo alle possibili evoluzioni delle regolamentazioni spaziali entro il 2040, invitandoli a fornire previsioni su come il contesto normativo potrebbe cambiare per rispondere alle sfide emergenti e alle opportunità offerte dall'espansione delle attività spaziali.

Gli esperti hanno sottolineato l'importanza dell'emergere delle attività commerciali spaziali, con aziende private come SpaceX, Blue Origin e OneWeb che hanno trasformato significativamente l'industria spaziale. Questo sviluppo ha portato alla pionerizzazione di nuove tecnologie e modelli di business che richiedono aggiornamenti delle normative esistenti. Attualmente, solo alcuni regolamenti nazionali, come il Commercial Space Launch Competitiveness Act (2015) degli Stati Uniti, forniscono un quadro per le attività spaziali commerciali, inclusi i lanci, le operazioni di rientro e l'estrazione e l'utilizzo delle risorse spaziali. Un'altra area critica è la gestione del traffico spaziale, resa sempre più urgente dall'aumento del numero di satelliti e dei detriti spaziali. Una gestione efficace del traffico spaziale implica il coordinamento delle operazioni dei satelliti per prevenire collisioni e mitigare la creazione di detriti spaziali. Organizzazioni come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Esterno (UNOOSA) e il Comitato Inter-agenzia per il Coordinamento dei Detriti Spaziali (IADC) stanno sviluppando linee guida e protocolli per garantire l'uso sicuro e sostenibile dello spazio esterno (Lyll, 2016). La sostenibilità e la protezione ambientale sono considerate essenziali per la sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali. Ciò richiede misure per proteggere l'ambiente spaziale dall'inquinamento e dal degrado. Iniziative come le linee guida per la sostenibilità a lungo termine delle attività nello spazio esterno, sviluppate dal Comitato delle Nazioni Unite per gli Usi Pacifici dello Spazio Esterno (COPUOS), mirano a promuovere comportamenti responsabili nello spazio. Queste linee guida coprono vari aspetti, tra cui lo smaltimento sicuro dei satelliti dismessi, la prevenzione della contaminazione dannosa dei corpi celesti e la mitigazione dei detriti spaziali. Gli esperti vedono positivamente la proposta della Commissione Europea di aggiornare il codice di condotta per le operazioni spaziali sicure come una linea guida essenziale per la sostenibilità nel settore (European Space Policy, s.d.). Sarà proprio su questo punto, considerato fondamentale all'interno del panorama spaziale e della sua sostenibilità, che si concentrerà uno dei capitoli successivi di questo elaborato. In conclusione, le previsioni degli esperti suggeriscono che le regolamentazioni spaziali entro il 2040 dovranno evolversi per rispondere alle nuove dinamiche del settore, garantendo al contempo la sicurezza, la sostenibilità e la cooperazione internazionale nello spazio. Osserviamo di seguito i risultati delle risposte al questionario relativamente alle tre macroaree fondamentali rintracciate all'interno del questionario. I dati si riferiscono alle condizioni attuali del settore e verranno confrontati, successivamente, con le opinioni proiettate nel 2040.

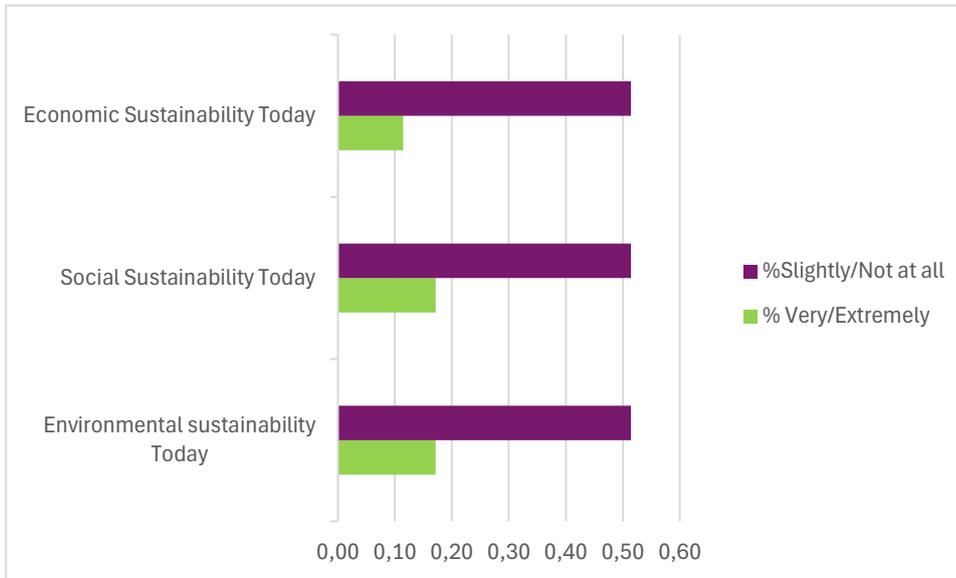


Figura 5: Statistiche relative alle condizioni attuali

Dall'analisi delle statistiche relative alle risposte fornite al questionario, emerge una chiara e diffusa insoddisfazione riguardo all'attuale quadro delle regolamentazioni spaziali, in particolare per quanto concerne la promozione di pratiche sostenibili. Questa insoddisfazione si estende alle tre dimensioni fondamentali proposte all'interno dell'indagine: economica, sociale e ambientale. Sul fronte economico, i partecipanti hanno espresso preoccupazioni significative sul fatto che le regolamentazioni spaziali attuali non forniscano incentivi adeguati allo sviluppo sostenibile del settore. Le risposte indicano una percezione di inadeguatezza nelle politiche volte a promuovere investimenti responsabili e a lungo termine nell'economia spaziale. Molti partecipanti ritengono che le normative attuali favoriscano pratiche economiche che privilegiano il profitto immediato piuttosto che la sostenibilità a lungo termine. In particolare, è stata segnalata la necessità di rivedere i meccanismi di finanziamento e le politiche fiscali per incoraggiare l'adozione di tecnologie verdi e sostenibili da parte delle aziende operanti nel settore spaziale. Dal punto di vista sociale, l'insoddisfazione è altrettanto marcata. I partecipanti hanno evidenziato una mancanza di inclusività e di equità nelle regolamentazioni spaziali attuali. In particolare, è emerso che le politiche vigenti non riescono a garantire una distribuzione equa dei benefici derivanti dall'esplorazione e dall'utilizzo delle risorse spaziali. Le comunità locali e i paesi in via di sviluppo, in particolare, sentono di essere marginalizzati e di non avere accesso equo alle opportunità offerte dall'economia spaziale. Questo senso di esclusione può portare a tensioni sociali e a una percezione di ingiustizia, che minano la legittimità delle regolamentazioni spaziali attuali. Infine, la dimensione ambientale rappresenta un'altra area critica di insoddisfazione. I partecipanti hanno manifestato preoccupazioni riguardo alla capacità delle attuali regolamentazioni di prevenire e mitigare gli impatti ambientali negativi delle attività spaziali. In particolare, è stato segnalato che le normative esistenti non affrontano adeguatamente i rischi legati alla contaminazione dello spazio e dei corpi celesti, né prevedono misure sufficienti per garantire la gestione sostenibile delle risorse spaziali. Si evidenzia la necessità di implementare regolamentazioni più stringenti e di sviluppare tecnologie innovative per minimizzare l'impatto ambientale delle missioni spaziali.

Questo quadro di insoddisfazione suggerisce un urgente bisogno di revisione e aggiornamento delle regolamentazioni spaziali per garantire un approccio più sostenibile, equo e inclusivo. La promozione di pratiche economiche sostenibili, l'inclusione sociale e la protezione ambientale devono essere

prioritariamente integrate nelle politiche spaziali future. Solo attraverso un impegno concertato e una cooperazione internazionale sarà possibile affrontare efficacemente le sfide e le opportunità offerte dall'espansione delle attività spaziali.

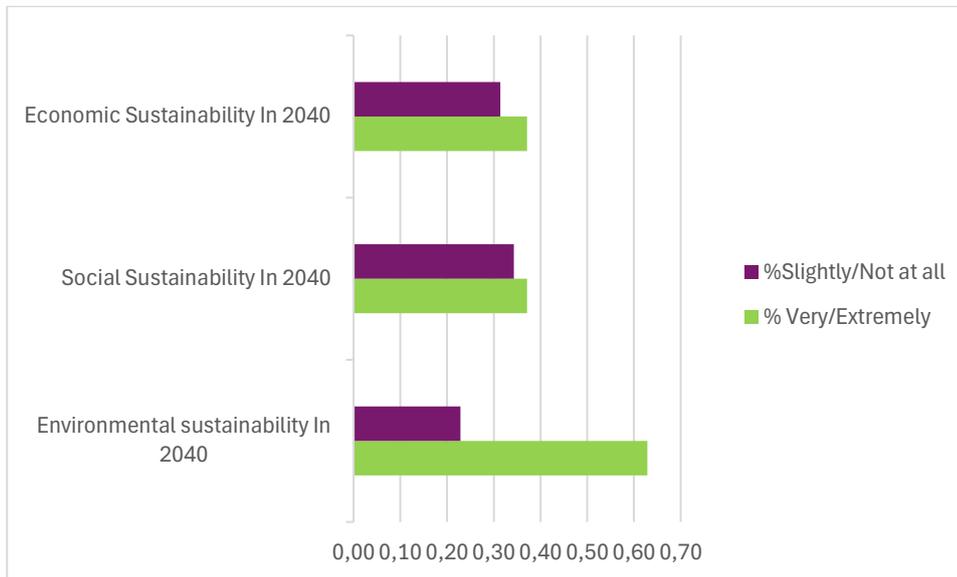


Figura 6: Statistiche relative alle condizioni proiettate nel 2040

Nonostante l'insoddisfazione generale, l'analisi delle risposte al questionario rivela anche una certa fiducia nel miglioramento delle regolamentazioni spaziali entro il 2040. In particolare, i partecipanti sono ottimisti riguardo alla possibilità che vengano introdotte normative più efficaci e stringenti, soprattutto per quanto riguarda la protezione ambientale. Questa fiducia si fonda su diversi fattori chiave, ciascuno dei quali riveste un ruolo fondamentale nel plasmare il panorama spaziale del domani.

In primo luogo, vi è un forte consenso tra i partecipanti riguardo al ruolo cruciale del progresso tecnologico nel migliorare la sostenibilità delle operazioni spaziali. L'innovazione continua e lo sviluppo di tecnologie avanzate sono visti come pilastri centrali per ridurre l'impatto ambientale delle attività spaziali. Questo include l'adozione di materiali ecocompatibili per la costruzione di satelliti e veicoli spaziali, nonché lo sviluppo di sistemi efficienti per la gestione dei rifiuti spaziali. L'ottimismo riguardo a tali avanzamenti tecnologici alimenta la fiducia nel potenziale di miglioramento continuo della sostenibilità nello spazio. In secondo luogo, c'è un ampio consenso sulla crescente importanza della collaborazione internazionale nel campo delle regolamentazioni spaziali. Gli attori del settore spaziale vedono con favore un rafforzamento delle normative internazionali e delle iniziative multilaterali volte a garantire la sostenibilità delle attività spaziali. Gli accordi globali e la cooperazione tra nazioni sono considerati essenziali per affrontare le sfide complesse e globali associate alla gestione dei detriti spaziali, alla protezione delle orbite e alla promozione di pratiche responsabili nello sfruttamento delle risorse spaziali. L'auspicio di una governance spaziale più coordinata riflette la consapevolezza dell'interdipendenza crescente tra le nazioni nel contesto delle attività spaziali. Terzo, c'è una crescente consapevolezza dell'importanza della pressione pubblica e della società civile nel promuovere regolamentazioni più sostenibili nello spazio. Il pubblico, i media e le organizzazioni non governative giocano un ruolo cruciale nel sollevare le questioni ambientali e sociali correlate all'esplorazione spaziale. Questo aumentato interesse pubblico spinge i decisori politici a considerare più attentamente l'adozione di normative che favoriscano la sostenibilità delle attività spaziali. La società civile, inoltre,

esercita una pressione costante affinché le politiche spaziali rispettino standard elevati di responsabilità ambientale e sociale, contribuendo così a orientare le decisioni politiche verso soluzioni più sostenibili e a lungo termine (OECD Publishing, Organisation for Economic Co-operation and Development Staff, 2012).

Questi elementi costituiscono il fondamento su cui basare le politiche future per garantire che lo spazio rimanga un ambiente sicuro, sostenibile e condiviso per le generazioni future. L'interconnessione di questi fattori riflette un impegno collettivo verso un futuro spaziale più resiliente e orientato verso il bene comune globale. L'analisi delle risposte al questionario evidenzia una percezione critica delle attuali regolamentazioni spaziali in termini di promozione della sostenibilità economica, sociale e ambientale. Tuttavia, esiste una fiducia significativa nel fatto che le cose possano migliorare entro il 2040, soprattutto grazie ai progressi tecnologici, alla cooperazione internazionale e alla crescente consapevolezza e pressione pubblica. Questi fattori sono visti come catalizzatori per il cambiamento e il miglioramento delle politiche e delle pratiche nel settore spaziale, al fine di garantire un futuro sostenibile per l'esplorazione e l'utilizzo delle risorse spaziali. La rapida crescita della space economy richiede quadri giuridici e normativi robusti e lungimiranti. Affrontando le sfide e le opportunità delle attività spaziali moderne, le leggi e i regolamenti spaziali possono facilitare uno sviluppo sostenibile, promuovere la cooperazione internazionale e garantire che lo spazio esterno rimanga un dominio di pace e prosperità per tutta l'umanità. Il diritto spaziale dovrà adattarsi a una realtà sempre più complessa e dinamica, bilanciando le esigenze di progresso tecnologico e commerciale con quelle di sostenibilità, sicurezza e cooperazione internazionale.

3.2. Space policies

3.2.1. Introduzione

La seconda sezione del questionario si concentra sulle politiche spaziali e sul loro ruolo di supporto alla sostenibilità nell'ambito delle attività spaziali. A tal fine, è stata esaminata l'attuale struttura delle politiche globali e di seguito si è fatta un'analisi delle opinioni raccolte all'interno del questionario. Questo approccio ha permesso di valutare in che misura le politiche spaziali attuali, che includono programmi di finanziamento, incentivi fiscali, partnership pubblico-private e linee guida operative, supportano lo sviluppo di un'industria spaziale sostenibile.

Le politiche spaziali nazionali definiscono il focus e la direzione degli sforzi di uno Stato nel settore spaziale. Rappresentano, di fatto, un insieme complesso e articolato di linee guida, regolamenti e strategie adottate dai governi nazionali e dalle organizzazioni internazionali per promuovere e regolare le attività spaziali. Queste mirano a promuovere lo sviluppo di un'infrastruttura spaziale robusta e sostenibile, capace di supportare una varietà di attività commerciali, scientifiche e militari, nonché un ambiente propizio per l'innovazione e gli investimenti. Gli obiettivi principali delle politiche spaziali nazionali e internazionali includono il rafforzamento della sicurezza nazionale attraverso il controllo e la protezione delle risorse spaziali, la promozione della ricerca scientifica e dell'innovazione tecnologica, e il sostegno alla crescita economica mediante lo sviluppo di nuovi mercati e opportunità di lavoro. La ricerca e l'innovazione rappresentano un pilastro fondamentale di queste politiche, perseguite attraverso ingenti investimenti in ricerca e sviluppo, la collaborazione con istituti di ricerca e università, e l'incoraggiamento delle partnership tra il settore pubblico e quello privato. Un aspetto cruciale di tali politiche è il sostegno alle start-up e alle piccole e medie imprese nel settore spaziale (European Space Policy, s.d.). Molti governi offrono incentivi fiscali, sovvenzioni e programmi di incubazione per facilitare l'ingresso di nuovi attori nel mercato spaziale. Questo approccio non solo diversifica l'industria spaziale, ma crea anche nuove opportunità di lavoro e stimola l'economia locale e nazionale, come evidenziato dalla politica spaziale europea.

La sicurezza nazionale, come visto per le regolamentazioni e i trattati, è un altro obiettivo fondamentale delle politiche spaziali, perseguito attraverso la diplomazia spaziale, che gioca un ruolo cruciale nel mantenere la pace e la sicurezza nello spazio. Le politiche spaziali includono negoziati e accordi per prevenire la militarizzazione dello spazio e promuovere l'uso pacifico delle risorse spaziali. La gestione delle controversie internazionali riguardanti le attività spaziali è essenziale per garantire che lo spazio rimanga un dominio di cooperazione piuttosto che di conflitto. Inoltre, queste politiche comprendono la protezione delle infrastrutture spaziali critiche, come i satelliti per le comunicazioni e il GPS, la difesa contro minacce spaziali, come i detriti spaziali o le armi anti-satellite, e l'uso dello spazio per migliorare le capacità militari e di intelligence. Questo approccio integrato assicura che le risorse spaziali siano protette e utilizzate in modo sicuro e sostenibile, contribuendo alla sicurezza nazionale e globale.

Le politiche spaziali promuovono anche l'educazione e la formazione nelle discipline STEM (scienza, tecnologia, ingegneria e matematica), essenziali per sviluppare la prossima generazione di scienziati, ingegneri e tecnici che guideranno i futuri sforzi spaziali. Iniziative educative possono includere programmi di borse di studio, opportunità di stage presso agenzie spaziali e programmi di divulgazione scientifica per ispirare gli studenti fin dalla giovane età. Queste misure sono fondamentali per garantire un flusso continuo di talenti qualificati nel settore spaziale, sostenendo la crescita e l'innovazione a lungo termine. Esse non solo preparano una forza lavoro competente, ma contribuiscono anche a una cultura di innovazione e scoperta scientifica (Research and Development, s.d.).

Se a livello internazionale le politiche spaziali sono influenzate da quell'insieme di trattati e regolamentazioni descritti nel capitolo precedente di questo elaborato, vediamo che a livello nazionale,

le politiche spaziali sono spesso sviluppate e implementate da agenzie governative specializzate, come la NASA negli Stati Uniti, l'ESA in Europa, o la CNSA in Cina. Queste agenzie coordinano le attività spaziali civili e militari, sviluppano programmi di ricerca e sviluppo, e regolano l'industria spaziale commerciale. Le politiche spaziali, dunque, variano da paese a paese, riflettendo le priorità nazionali e le risorse disponibili. Di seguito sono elencate alcune delle iniziative più rilevanti promosse dai Paesi con i poli spaziali più sviluppati:

- Stati Uniti: tra le più importanti figurano la Space Policy Directive-1 (SPD-1, firmata nel dicembre 2017, che incarica la NASA di tornare sulla Luna con astronauti americani, seguita da missioni umane su Marte, e la National Space Policy, rilasciata nel dicembre 2020, che sottolinea l'importanza dell'uso pacifico dello spazio, la leadership americana nello spazio commerciale, e la protezione delle infrastrutture spaziali nazionali (US Department of Defense. (2020). Defense Space Strategy). La National Space Strategy integra le politiche di difesa, commercio, e sicurezza nazionale con l'obiettivo di garantire la superiorità americana nello spazio (The White House. (2020). National Space Policy). Infine, programma Commercial Crew e il Lunar Gateway rappresentano due pietre miliari cruciali nella continua esplorazione spaziale umana, incarnando il futuro ambizioso dell'umanità nel cosmo. Questi progetti non solo segnano il passaggio a una nuova era di collaborazione internazionale nello spazio, ma anche l'avvento di tecnologie innovative e sostenibili che promettono di trasformare il nostro rapporto con l'universo. Il Commercial Crew Program, gestito dalla NASA, ha rivoluzionato l'accesso allo spazio basso orbitale (LEO) attraverso partnership con aziende private come SpaceX e Boeing. Questo approccio ha permesso agli Stati Uniti di ristabilire una capacità di lancio umano indipendente dal 2011, con il pensionamento dello Space Shuttle. SpaceX, in particolare, ha giocato un ruolo cruciale con il suo veicolo Crew Dragon, che ha inaugurato una nuova era di voli spaziali privati con equipaggio verso la Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Questa partnership non solo ha ridotto i costi di accesso allo spazio, ma ha anche stimolato l'innovazione tecnologica nel settore aerospaziale commerciale. Parallelamente, il Lunar Gateway, un progetto internazionale guidato dalla NASA insieme a partner come ESA, JAXA e CSA, si propone di stabilire una piattaforma orbitale lunare per facilitare l'esplorazione sostenibile della Luna e, a lungo termine, preparare il terreno per missioni umane su Marte. Questa stazione spaziale in orbita lunare agirà come un centro di comando e hub per missioni di esplorazione, fornendo supporto logistico, scientifico e abitativo. Il Lunar Gateway non solo apre la strada a nuove scoperte scientifiche e tecnologiche, ma anche promuove la cooperazione internazionale nello spazio, incoraggiando la condivisione di risorse e conoscenze tra le nazioni. Entrambi i programmi incarnano i principi della collaborazione internazionale e dell'innovazione tecnologica che sono fondamentali per l'avanzamento dell'esplorazione spaziale umana nel XXI secolo. Essi riflettono anche un impegno crescente verso obiettivi a lungo termine, come la sostenibilità ambientale nello spazio e l'espansione dell'orizzonte umano oltre la Terra. Con l'avanzamento di questi progetti, siamo testimoni di un momento storico in cui il sogno di esplorare l'universo diventa sempre più una realtà tangibile.
- Europa: tra le principali c'è la European Space Policy promossa dall'Unione Europea e dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA). L'iniziativa si concentra sulla cooperazione tra i membri dell'UE, lo sviluppo delle capacità industriali spaziali e l'uso dello spazio per rispondere alle sfide globali, come il cambiamento climatico. Un'altra iniziativa importante dell'UE è il Copernicus Programme per sviluppare la capacità di osservazione della Terra a supporto delle politiche ambientali e di sicurezza. Copernicus è la componente di osservazione terrestre del Programma Spaziale dell'Unione Europea, finalizzata a fornire informazioni precise e tempestive per migliorare la gestione ambientale, comprendere e mitigare gli effetti del cambiamento climatico e garantire la sicurezza civile. Guidato dalla Commissione Europea (CE)

in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), Copernicus coordina la fornitura di dati da oltre 30 satelliti. L'ESA ha sviluppato la famiglia di satelliti Sentinel, progettati per soddisfare le esigenze operative del programma. Questi offrono osservazioni uniche, dalle immagini radar all-weather della missione Sentinel-1 alle immagini ottiche ad alta risoluzione dei satelliti Sentinel-2, fino ai dati oceanografici e terrestri di Sentinel-3. Sentinel-4 e -5 monitoreranno la composizione atmosferica, mentre Sentinel-6 misurerà l'altezza della superficie del mare. Copernicus integra questi dati in servizi tematici in sei aree principali: gestione del territorio, ambiente marino, atmosfera, risposta alle emergenze, sicurezza e cambiamento climatico. Questi servizi sono progettati per migliorare l'ambiente, il nostro modo di vivere, rispondere alle esigenze umanitarie e supportare politiche sostenibili. L'ESA, con la sua esperienza trentennale, contribuisce al successo di Copernicus sviluppando e gestendo sistemi operativi avanzati.

- Cina: la politica spaziale cinese mira a trasformare la Cina in una potenza spaziale leader entro il 2045. Include obiettivi come l'esplorazione della Luna e di Marte, la costruzione di una stazione spaziale permanente, e lo sviluppo delle capacità di lancio spaziale (China's Space Program: A 2021 Perspective, s.d.). Questa ambiziosa strategia riflette l'impegno della Cina nel consolidare la propria posizione di leadership nello spazio, attraverso investimenti significativi in tecnologia e infrastrutture spaziali.
- Canada: la politica spaziale canadese enfatizza l'uso delle risorse spaziali per lo sviluppo scientifico e commerciale, con un forte impegno nella collaborazione internazionale. In particolare, il Canada partecipa al programma Artemis della NASA, dimostrando il suo impegno a lavorare in sinergia con gli Stati Uniti per esplorare lo spazio profondo. (Government of Canada, 2019)

Queste diverse strategie nazionali riflettono un panorama spaziale globale in cui la cooperazione e la competizione coesistono. Gli Stati Uniti continuano a perseguire una leadership forte e assertiva, mentre l'Europa punta su un approccio cooperativo e sostenibile. La Cina sta emergendo come una nuova superpotenza spaziale con ambizioni a lungo termine, e il Canada cerca di sfruttare le opportunità scientifiche e commerciali attraverso collaborazioni internazionali. Queste politiche, seppur diverse, convergono nell'obiettivo comune di avanzare la presenza umana nello spazio e sfruttare le risorse spaziali per il beneficio dell'umanità.

3.2.2. Analisi

L'analisi dettagliata delle statistiche raccolte tramite il questionario rivela un'insoddisfazione prevalente tra i partecipanti riguardo all'efficacia attuale delle politiche spaziali nel supportare la sostenibilità specialmente nella dimensione sociale. Il questionario ha fornito una panoramica chiara delle percezioni attuali e delle aspettative future riguardo alle politiche spaziali.

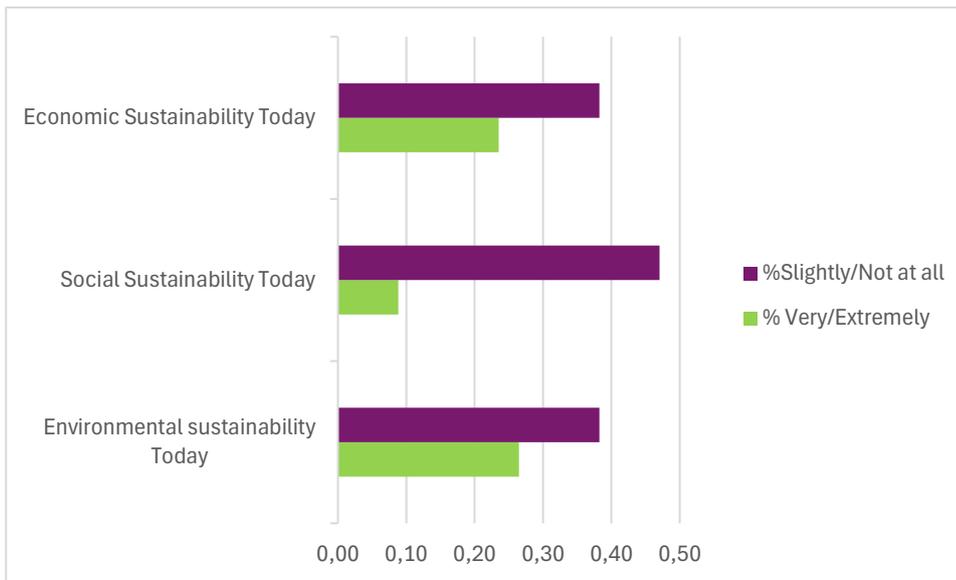


Figura 7: Statistiche relative alle condizioni attuali

Nella dimensione economica, una parte significativa dei rispondenti ha espresso dubbi sull'efficacia delle politiche spaziali nel promuovere una crescita economica sostenibile. Questa incertezza mette in luce la necessità di politiche maggiormente orientate alla creazione di valore economico attraverso l'innovazione tecnologica e lo sviluppo di settori industriali correlati allo spazio. Sebbene le iniziative attuali, come la commercializzazione delle tecnologie spaziali, siano riconosciute e apprezzate, emerge chiaramente la richiesta di strategie più incisive per stimolare gli investimenti e incentivare le partnership pubblico-privato nel settore spaziale. Questo suggerisce che le politiche future dovranno concentrarsi sulla promozione di un ecosistema che favorisca la ricerca e lo sviluppo, nonché l'implementazione di nuove tecnologie che possano generare benefici economici sostenibili a lungo termine (Stanley, 2019). Particolarmente rilevante è l'insoddisfazione manifestata nella dimensione sociale, dove i partecipanti al questionario hanno indicato una percezione limitata del contributo delle politiche spaziali al miglioramento della qualità della vita e alla riduzione delle disuguaglianze sociali. Le attuali politiche sono criticate per la loro capacità di integrare l'accessibilità e l'inclusività nelle opportunità derivanti dalle tecnologie spaziali. In questo contesto, emerge con forza la necessità di politiche che siano più orientate all'equità e all'accesso universale alle risorse spaziali, considerate fondamentali per il miglioramento delle condizioni sociali a livello globale. Le politiche future dovranno, quindi, includere misure volte a garantire che i benefici delle attività spaziali siano equamente distribuiti, riducendo le disparità e offrendo opportunità a comunità emarginate e regioni sottosviluppate. In ambito sociale, i partecipanti al questionario hanno manifestato una percezione limitata del contributo delle politiche spaziali al miglioramento della qualità della vita e alla riduzione delle disuguaglianze sociali. Le attuali politiche sono criticate per la loro capacità di integrare l'accessibilità e l'inclusività nelle opportunità derivanti dalle tecnologie spaziali. In questo contesto, emerge con forza la necessità di politiche che siano più orientate all'equità e all'accesso universale alle risorse spaziali, considerate fondamentali per il miglioramento delle condizioni sociali a livello globale. Le politiche future dovranno, quindi, includere misure volte a garantire che i benefici delle attività spaziali siano equamente distribuiti, riducendo le disparità e offrendo opportunità a comunità emarginate e regioni sottosviluppate. Per quanto concerne la dimensione ambientale, i risultati mostrano una sorprendente somiglianza con quelli ottenuti nella dimensione economica, sebbene con una sfumatura di ottimismo leggermente più accentuata, come si osserverà approfonditamente più avanti all'interno di questo capitolo. Un numero significativo di rispondenti manifesta una fiducia

palpabile nel potenziale delle future politiche di mitigazione degli impatti ambientali derivanti dalle attività spaziali. Questo ottimismo è principalmente alimentato dalla crescente attenzione rivolta alla gestione dei rifiuti spaziali e all'utilizzo delle tecnologie satellitari per monitorare e contrastare i cambiamenti climatici. Tale fiducia trova riscontro nel crescente impegno delle agenzie spaziali nel riconoscere l'importanza di sviluppare tecnologie che riducano al minimo l'impatto ambientale delle operazioni spaziali.

Come sottolineato più volte all'interno di questo capitolo, la rapida crescita della space economy richiede quadri giuridici e normativi robusti e lungimiranti. Affrontando le sfide e le opportunità delle attività spaziali moderne, le leggi e i regolamenti spaziali possono facilitare uno sviluppo sostenibile, promuovere la cooperazione internazionale e garantire che lo spazio esterno rimanga un dominio di pace e prosperità per tutta l'umanità. Il diritto spaziale dovrà adattarsi a una realtà sempre più complessa e dinamica, bilanciando le esigenze di progresso tecnologico e commerciale con quelle di sostenibilità, sicurezza e cooperazione internazionale.

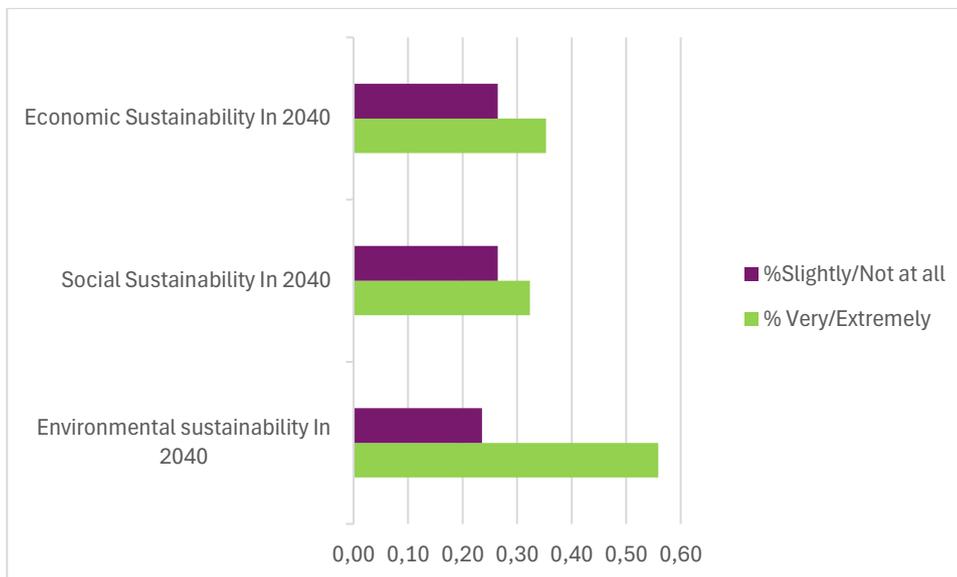


Figura 8: Statistiche relative alle condizioni proiettate nel 2040

Guardando avanti, vi è un consenso tra i partecipanti che le politiche spaziali miglioreranno significativamente entro il 2040, soprattutto nell'ambito ambientale. Le aspettative si concentrano sulla promozione di politiche più integrate e proattive che incoraggino l'innovazione tecnologica per affrontare sfide ambientali globali e migliorare la qualità della vita sulla Terra. Un numero significativo di rispondenti esprime fiducia nel potenziale delle politiche future nel mitigare gli impatti ambientali derivanti dalle attività spaziali, come la gestione dei rifiuti spaziali e l'utilizzo delle tecnologie satellitari per monitorare e mitigare i cambiamenti climatici. La percezione positiva è supportata dalla crescente consapevolezza delle agenzie spaziali internazionali riguardo alla necessità di sviluppare tecnologie sostenibili e pratiche di governance responsabile nello spazio. Questo include sviluppi significativi in ambito di propulsione, materiali innovativi, e sistemi automatizzati che potrebbero migliorare l'efficienza delle missioni spaziali e ridurre l'impronta ambientale delle attività spaziali. Le prospettive includono anche l'implementazione di normative più robuste per la sostenibilità nello spazio, la collaborazione internazionale rafforzata per affrontare le sfide comuni, e l'adozione di pratiche migliori nel ciclo di vita delle tecnologie spaziali. L'implementazione di sistemi satellitari più avanzati, in questo senso, potrebbe fornire informazioni cruciali per la gestione sostenibile delle risorse naturali e per supportare le decisioni politiche mirate alla riduzione delle emissioni di gas serra (Stanley, 2019). Questi

sviluppi tecnologici rappresentano un passo significativo verso una maggiore sostenibilità nelle operazioni spaziali. L'ottimismo riguardo a tali avanzamenti riflette la consapevolezza crescente che la sostenibilità ambientale non è solo una necessità ma anche una possibilità concreta grazie alle innovazioni tecnologiche. Questo sentimento di fiducia è ulteriormente alimentato dalle collaborazioni internazionali e dai consorzi di ricerca che uniscono le competenze di diverse nazioni e istituzioni per affrontare le sfide ambientali comuni nello spazio (UNOOSA, 2023). L'ottimismo espresso dai rispondenti non è quindi privo di fondamento, ma piuttosto radicato in un solido contesto di innovazione tecnologica e cooperazione internazionale. La crescente attenzione alla sostenibilità ambientale nello spazio rispecchia una tendenza più ampia verso la responsabilità ecologica in tutti i settori delle attività umane. La fiducia nel potenziale delle future politiche e tecnologie di mitigazione si basa sulla concreta possibilità di sviluppare soluzioni che non solo riducano l'impatto ambientale delle operazioni spaziali, ma che contribuiscano anche alla protezione del nostro pianeta.

In conclusione, l'analisi delle risposte al questionario evidenzia un'urgenza crescente nel rivedere e raffinare le politiche spaziali esistenti per affrontare efficacemente le sfide globali in ambito economico, sociale ed ambientale. Tuttavia, esiste una fiducia significativa nel fatto che le cose possano migliorare entro il 2040, soprattutto grazie ai progressi tecnologici, alla cooperazione internazionale e alla crescente consapevolezza e pressione pubblica. Questi fattori sono visti come catalizzatori per il cambiamento e il miglioramento delle politiche e delle pratiche nel settore spaziale, al fine di garantire un futuro sostenibile per l'esplorazione e l'utilizzo delle risorse spaziali. La fiducia nella trasformazione positiva delle politiche spaziali indica un potenziale significativo per guidare un futuro sostenibile attraverso un uso responsabile e innovativo dello spazio. Gli insider del settore sono ottimisti riguardo al ruolo positivo che le politiche potranno svolgere nei prossimi decenni. Con il giusto supporto politico, normativo e finanziario, il settore spaziale ha il potenziale per diventare un esempio di sostenibilità e innovazione a livello globale.

3.3. Debris mitigation

3.3.1. Introduzione e Criticità

La terza sezione del questionario affronta in maniera approfondita il problema dei detriti spaziali e le sue principali criticità. Il capitolo si propone di analizzare le opinioni degli esperti del settore, raccolte attraverso il questionario, circa le problematiche più significative che ostacolano lo sviluppo spaziale sostenibile e un apparato di politiche efficaci che lo sostengano entro il 2040. Parallelamente, il capitolo si focalizzerà sull'importanza e l'influenza degli stakeholders principali nel supporto e nell'implementazione di pratiche sostenibili per mitigare il problema dei detriti spaziali. Saranno analizzati il ruolo delle grandi imprese, delle PMI e delle startup, delle agenzie spaziali e dei corpi internazionali e nazionali, nonché delle università e dei centri di ricerca. Attraverso questa analisi, si intende offrire una visione complessiva e dettagliata delle dinamiche che regolano il settore e delle possibili soluzioni per un futuro spaziale più sostenibile.

L'esplorazione dello spazio ha conosciuto una crescita straordinaria grazie ai progressi di scienza, tecnologia e innovazione. Tuttavia, questa espansione ha portato con sé notevoli sfide di sostenibilità, tra cui i detriti spaziali che emergono come una preoccupazione critica. I detriti spaziali sono frammenti di veicoli spaziali, satelliti dismessi e altri oggetti artificiali che orbitano attorno alla Terra. Questi detriti rappresentano una minaccia significativa per i satelliti operativi, le stazioni spaziali e le missioni con equipaggio. Negli ultimi dieci anni, l'uso delle orbite terrestri, soprattutto quelle a bassa altitudine (LEO), è cresciuto rapidamente a causa dell'incremento delle attività spaziali sia istituzionali che commerciali (Liou, 2010). Questa tendenza è destinata a intensificarsi con il lancio di megacostellazioni per la banda larga satellitare, potenzialmente composte da migliaia di satelliti.

La gestione dei detriti spaziali comporta già costi notevoli per gli operatori satellitari, che devono affrontare spese per la sorveglianza dei detriti, l'evitamento delle collisioni, e la protezione e la sostituzione dei satelliti. Tali costi potrebbero aumentare ulteriormente se la generazione di detriti non fosse controllata, con il rischio di rendere alcune orbite critiche inutilizzabili a causa di collisioni a cascata, fenomeno noto come sindrome di Kessler (Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective, 2020). Inoltre, persistono sfide tecnologiche nel tracciare e monitorare la stragrande maggioranza dei detriti spaziali, che attualmente coprono solo una piccola frazione della popolazione stimata di detriti con dimensioni superiori a 1 millimetro nelle orbite terrestri. Questi scenari potrebbero avere conseguenze socioeconomiche gravi, compromettendo applicazioni spaziali vitali come la previsione meteorologica, il monitoraggio climatico e le comunicazioni satellitari.

Per migliorare il rispetto delle linee guida di mitigazione dei detriti e internalizzare i costi dell'inquinamento da detriti, potrebbero rivelarsi efficaci strumenti politici provenienti da altri settori di mitigazione dell'inquinamento, come l'implementazione di tasse, permessi negoziabili, meccanismi di sicurezza finanziaria e accordi volontari tra operatori satellitari. È essenziale potenziare le capacità di consapevolezza situazionale nello spazio (SSA), promuovere la ricerca e lo sviluppo di tecnologie per la rimozione dei detriti e incoraggiare progettazioni sostenibili per veicoli spaziali e tecnologie di propulsione (Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective, 2020).

Attualmente, non esiste un trattato internazionale specifico che regoli in modo esaustivo la gestione dei detriti spaziali, anche se varie linee guida, come quelle sviluppate dal Comitato delle Nazioni Unite per l'Uso Pacifico dello Spazio Extra-atmosferico (COPUOS) e dall'Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC), offrono raccomandazioni sulle migliori pratiche per ridurre e mitigare i detriti. Le linee guida sviluppate dal COPUOS includono principi per assicurare che le attività spaziali siano

sostenibili nel lungo periodo, promuovendo la cooperazione internazionale e la condivisione delle informazioni. Tuttavia, il rispetto di queste misure rimane insufficiente, soprattutto in LEO, dove gli operatori satellitari talvolta intraprendono azioni come test anti-satellite. La gestione efficace dei detriti spaziali, infatti, è ostacolata da complessità legali legate alla proprietà dei detriti, questioni di responsabilità e la necessità di sviluppare meccanismi di finanziamento per le operazioni di rimozione dei detriti (Liou, 2010). L'auspicio è che vengano introdotte normative più stringenti per obbligare le aziende e le agenzie spaziali a ridurre la produzione di detriti spaziali e a implementare tecnologie per la rimozione attiva dei detriti esistenti. Si pensi a nuovi trattati che impongano standard obbligatori per la gestione dei detriti, inclusi requisiti per il deorbiting dei satelliti e per la rimozione attiva dei detriti, licenze di estrazione e meccanismi di profit-sharing per garantire che i benefici siano equamente distribuiti tra le nazioni. Incentivi normativi potrebbero essere creati per incoraggiare lo sviluppo e l'adozione di tecnologie per la mitigazione dei detriti, come veicoli di servizio in orbita per la manutenzione, il rifornimento e la rimozione dei satelliti non operativi.

Ricollegandosi a quanto scritto nei capitoli precedenti di questo elaborato, è evidente la necessità di sviluppare un quadro normativo internazionale più robusto e inclusivo che rifletta le nuove realtà tecnologiche ed economiche dell'esplorazione spaziale commerciale e incentivi la cooperazione internazionale attraverso piattaforme multilaterali che coinvolgano tutti gli stakeholder, compresi governi, organizzazioni internazionali, aziende private e la comunità scientifica. L'estrazione e l'utilizzo delle risorse spaziali rappresentano un campo promettente ma complesso, che richiede una regolamentazione attenta e coordinata a livello internazionale. Si rende necessario, dunque affrontare questioni di diritti di proprietà, condivisione delle risorse e protezione ambientale. Questo approfondimento riflette l'urgenza e la complessità del problema dei detriti spaziali, sottolineando la necessità di soluzioni innovative e di una cooperazione globale per garantire la sostenibilità delle operazioni spaziali nel lungo periodo. Affrontare efficacemente il problema dei detriti spaziali è cruciale per garantire la sostenibilità a lungo termine delle operazioni spaziali e richiede un impegno coordinato a livello internazionale e collaborativo tra settori pubblici e privati. L'adozione di misure preventive basate sull'esperienza nella gestione dell'ambiente terrestre può mitigare i rischi associati ai detriti spaziali e preservare la futura capacità di svolgere attività spaziali vitali.

3.3.2. Soluzioni di Mitigazione

Negli ultimi decenni, vari paesi hanno adottato linee guida per la mitigazione dei detriti spaziali, come le linee guida della NASA in vigore dal 1995. Tuttavia, gli eventi di frammentazione del 2007 e del 2009 hanno aumentato la consapevolezza sulla questione, portando a numerosi studi sull'evoluzione futura dell'ambiente dei detriti spaziali. Uno studio condotto dal Comitato di Coordinamento Inter-agenzia sui Detriti Spaziali (IADC) ha identificato una buona implementazione delle linee guida internazionali per la mitigazione dei detriti come una misura chiave per stabilizzare il futuro ambiente in orbita terrestre bassa (IADC, 2013). In particolare, circa il 90% dei lanci futuri dovrebbe aderire alle linee guida per la rimozione dei detriti dall'orbita nei prossimi 100 anni, specialmente nell'orbita terrestre bassa (LEO). Per quanto riguarda la rimozione attiva dei detriti, uno studio della NASA ha raccomandato la rimozione di circa cinque oggetti "grandi e integri" all'anno (Liou, 2010).

Le misure di mitigazione e rimozione dei detriti spaziali rappresentano un insieme complesso di strategie necessarie per affrontare la crescente problematica dei detriti spaziali. Queste misure possono essere suddivise in tre categorie principali: limitazione dei detriti, rimozione attiva dei detriti e consapevolezza situazionale spaziale (SSA).

La limitazione dei detriti spaziali è fondamentale per prevenire la formazione di nuovi detriti durante le operazioni spaziali. Questo approccio include il design accurato dei payload e dei corpi dei razzi per minimizzare il rilascio di detriti durante le operazioni normali. È essenziale ridurre al minimo il potenziale di rotture in orbita, adottando misure che aumentino l'affidabilità dei sistemi e minimizzino l'energia immagazzinata in serbatoi e batterie dopo la missione. Un ulteriore elemento cruciale nella limitazione dei detriti è la disposizione post-missione dei satelliti, sia in orbita bassa (LEO) che geostazionaria (GEO). I satelliti in LEO devono essere deorbitati attivamente o passivamente entro 25 anni dal completamento della missione, mentre i satelliti in GEO devono essere spostati in un'orbita cimiteriale (Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective, 2020).

La rimozione attiva dei detriti, o nudging, rappresenta una sfida tecnica significativa ma necessaria per mantenere la sostenibilità delle attività spaziali. Questo processo coinvolge operazioni di prossimità, navigazione relativa e docking con piattaforme spaziali non cooperative per rimuoverle dall'orbita. Queste operazioni richiedono tecnologie avanzate e competenze sofisticate in termini di controllo e navigazione spaziale. La rimozione attiva dei detriti non solo contribuisce a ridurre la quantità di detriti già presenti in orbita, ma aiuta anche a prevenire collisioni future che potrebbero generare ulteriori detriti. Le missioni di rimozione attiva dei detriti sono cruciali per mantenere un ambiente spaziale sicuro e sostenibile e richiedono collaborazioni internazionali e investimenti significativi in ricerca e sviluppo. La consapevolezza situazionale spaziale (SSA) è un altro pilastro fondamentale nella gestione dei detriti spaziali. Essa comprende la sorveglianza e il tracciamento degli oggetti spaziali per monitorare i movimenti e prevedere le traiettorie dei detriti. L'evitamento delle collisioni è un elemento chiave della SSA, che richiede la condivisione dei dati tra le diverse agenzie spaziali e gli operatori satellitari per prevenire incidenti in orbita. La SSA consente di identificare potenziali rischi di collisione e di intraprendere azioni preventive per evitare impatti che potrebbero generare ulteriori detriti. Inoltre, la condivisione dei dati e la cooperazione internazionale sono essenziali per migliorare la precisione e l'efficacia delle operazioni di SSA. Attraverso una migliore consapevolezza situazionale, le nazioni e le organizzazioni spaziali possono coordinare le loro attività per mitigare i rischi associati ai detriti spaziali e garantire la sicurezza delle operazioni spaziali a lungo termine.

Il Comitato di Coordinamento Inter-agenzia sui Detriti Spaziali ha sviluppato il primo set di linee guida internazionali sulla mitigazione dei detriti nel 2001-2002, con una revisione minore nel 2007. Queste linee guida raccomandano che i satelliti GEO post-missione siano spostati in un'orbita cimiteriale e che i veicoli spaziali in LEO siano deorbitati o manovrati in un'orbita da cui il decadimento naturale avviene entro un massimo di 25 anni. La conformità a queste linee guida contribuirebbe notevolmente a stabilizzare l'ambiente orbitale (Liou, 2010). Le linee guida emesse dal Comitato di Coordinamento Inter-agenzia sui Detriti Spaziali nel 2001 e successivamente aggiornate nel 2007 hanno l'obiettivo di affrontare e mitigare il problema crescente dei detriti spaziali, un tema di grande rilevanza per la sostenibilità delle operazioni spaziali. Queste linee guida rappresentano un insieme di norme che gli operatori spaziali devono seguire per limitare l'impatto negativo delle loro attività sull'ambiente orbitale terrestre. Uno dei principali obiettivi delle linee guida è limitare i detriti spaziali rilasciati durante le operazioni normali. In questo contesto, si sottolinea l'importanza che i payload e i corpi dei razzi siano progettati in modo tale da non rilasciare detriti durante le operazioni ordinarie. Nei casi in cui questo non sia possibile, è richiesto che qualsiasi rilascio di detriti venga minimizzato sia in termini di numero che di area e durata orbitale. Tale approccio è fondamentale per ridurre il rischio di accumulo di detriti nello spazio, che potrebbe altrimenti aumentare il pericolo di collisioni future. Un altro aspetto cruciale delle linee guida riguarda la minimizzazione del potenziale di rotture in orbita. È essenziale che, in tutti i regimi operativi, il potenziale di rotture durante le fasi operative venga ridotto al minimo. Questo obiettivo può essere raggiunto aumentando l'affidabilità del sistema e riducendo il potenziale di rotture

post-missione derivanti dall'energia immagazzinata in serbatoi, batterie e altri componenti. Inoltre, le linee guida prevedono l'evitamento della distruzione intenzionale e di altre attività dannose, che potrebbero generare un elevato numero di detriti spaziali. La disposizione post-missione degli oggetti in orbita è un altro punto focale delle linee guida. Gli oggetti permanenti, o quasi permanenti, creati dall'uomo e non più funzionali devono essere rimossi dall'orbita per evitare che diventino detriti pericolosi. Per i payload situati in orbita terrestre bassa (LEO), questo implica il deorbiting attivo o passivo entro 25 anni dal completamento della missione. Per i payload in orbita geostazionaria (GEO), è richiesto che vengano spostati in un'orbita cimiteriale, una zona specificamente designata per ospitare satelliti non più in uso, lontana dalle orbite operative per ridurre il rischio di collisioni. Infine, le linee guida enfatizzano la prevenzione delle collisioni in orbita. I progetti di missione devono prevedere una stima accurata e limitare la probabilità di collisioni accidentali con oggetti noti durante la durata orbitale del payload o del corpo del razzo. Questo richiede un'attenta pianificazione e monitoraggio delle traiettorie orbitali, nonché l'implementazione di manovre correttive quando necessario per evitare impatti.

Le linee guida del Comitato di Coordinamento Inter-agenzia sui Detriti Spaziali rappresentano un insieme di principi fondamentali per la gestione sostenibile dello spazio. L'adozione e l'implementazione rigorosa di queste norme sono essenziali per garantire la sicurezza e la sostenibilità a lungo termine delle operazioni spaziali, contribuendo a preservare l'ambiente orbitale per le future generazioni. Negli ultimi vent'anni, il corpo delle linee guida, raccomandazioni e standard internazionali e nazionali è continuato a crescere e sta diventando sempre più completo, coprendo sia le attività governative che commerciali. L'ESA ha sviluppato il "Codice di Condotta Europeo per la Mitigazione dei Detriti Spaziali" (2004), in collaborazione con le agenzie spaziali in Italia, Regno Unito, Francia e Germania. Per la mitigazione dei detriti nell'orbita geostazionaria, l'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU) ha prodotto la raccomandazione ITU-R S.1003-2 (2010). Per colmare il divario tra gli obiettivi primari di mitigazione dei detriti spaziali e gli standard di livello inferiore e i rapporti tecnici, l'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) ha emesso una serie di standard di ingegneria per la mitigazione dei detriti spaziali (ISO 24113:2019) nel 2019 (Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective, 2020). Nel 2018, i 92 membri del Comitato delle Nazioni Unite per gli Usi Pacifici dello Spazio Extra-atmosferico hanno approvato un insieme molto più ampio di 21 linee guida per la sostenibilità a lungo termine (Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective, 2020). Le linee guida affrontano una serie di questioni relative alla sostenibilità spaziale (ad esempio, detriti, uso dello spettro radio, condizioni meteorologiche spaziali) e hanno sottolineato l'importanza della raccolta, condivisione e modellazione dei dati per incidenti di detriti spaziali e condizioni meteorologiche spaziali.

A livello nazionale, un numero crescente di paesi ha integrato disposizioni per la mitigazione dei detriti in leggi, standard tecnici, linee guida, ecc. Il livello di dettaglio, lo stato legale e la portata variano considerevolmente. La Francia è uno dei pochi paesi con una legge che elenca i requisiti tecnici obbligatori per la mitigazione dei detriti, mentre diversi altri paesi obbligano i richiedenti delle licenze di lancio spaziale a produrre studi di impatto ambientale, piani di mitigazione dei detriti o piani di smaltimento dei payload (ad esempio, Austria, Finlandia, Nuova Zelanda). Francia, Corea e Regno Unito richiedono inoltre agli operatori di sottoscrivere un'assicurazione di responsabilità civile verso terzi (Asi.it, 2020). La conformità ai diversi set di linee guida volontarie per il deorbiting sicuro dei vecchi satelliti varia in modo significativo e rimane fortemente dipendente dalle orbite considerate. Nell'orbita geostazionaria (GEO), circa l'85% dei payload in pensionamento viene collocato correttamente in orbite cimiteriali, in conformità con le linee guida internazionali. Per l'orbita terrestre bassa (LEO), circa il 20-25% dei payload in pensionamento e il 40-60% dei corpi dei razzi si deorbitano entro 25 anni, in linea con le linee guida internazionali. Nella GEO, la stragrande maggioranza delle manovre di smaltimento

sono di proprietà e gestite da operatori di comunicazioni commerciali. In LEO, dove i payload non sono una quota considerevole dei lanci totali, la conformità è generalmente inferiore (Liou, 2010). Una migliore conformità è stata osservata con i lanci da Stati Uniti, Europa, Giappone e Russia, mentre i satelliti lanciati da Cina e India mostrano tassi di conformità al deorbiting molto bassi. Anche tra i membri dell'IADC, la conformità è fortemente dipendente dall'orbita considerata e dall'applicazione nazionale delle linee guida IADC.

Nel 2019, gli Stati Uniti hanno aggiornato le loro pratiche standard per la mitigazione dei detriti orbitali per la prima volta dal 2001, introducendo, ad esempio, nuovi limiti quantitativi sugli eventi che producono detriti e affrontando problemi più recenti come il funzionamento dei cubesat, le grandi costellazioni e il servizio di satelliti. L'iniziativa più rilevante, però, è rappresentata dal "Space Resource Exploration and Utilization Act", promulgato negli Stati Uniti nel 2015 (Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective, 2020). Questa legge, rivoluzionaria nel contesto delle attività spaziali commerciali, autorizza le aziende statunitensi a possedere, trasportare, utilizzare e vendere risorse spaziali estratte da asteroidi e altri corpi celesti. Il "Space Resource Exploration and Utilization Act" stabilisce che le aziende possono rivendicare la proprietà delle risorse minerarie spaziali che riescono a estrarre. Questo crea un incentivo significativo per l'investimento privato in tecnologie avanzate di estrazione e utilizzo delle risorse spaziali. Negli ultimi anni, l'interesse per l'estrazione mineraria di asteroidi e della Luna è cresciuto notevolmente, attirando non solo l'attenzione degli Stati Uniti, ma anche di altri Paesi che hanno sviluppato leggi e regolamenti a supporto di tali attività, come il Lussemburgo. Le attività di estrazione devono essere autorizzate e supervisionate da agenzie governative competenti. Questo assicura che le operazioni siano condotte in conformità con gli standard di sicurezza e le normative vigenti. Tale supervisione è fondamentale per garantire che le attività spaziali siano svolte in modo responsabile e sicuro, proteggendo sia gli operatori che l'ambiente spaziale. La legge sottolinea inoltre che le operazioni di estrazione delle risorse spaziali devono essere svolte in maniera compatibile con gli obblighi internazionali degli Stati Uniti. Questo punto ha suscitato dibattiti significativi sulla sua interpretazione, poiché la comunità internazionale si interroga sulla compatibilità di tali attività con i trattati internazionali esistenti, come il Trattato sullo Spazio Extra-atmosferico del 1967 che stabiliva che lo spazio extra-atmosferico, inclusi la Luna e gli altri corpi celesti, non è soggetto ad appropriazione nazionale mediante sovranità, uso o occupazione, o con qualsiasi altro mezzo. La sfida, dunque, consisterà nel bilanciare gli interessi commerciali con la necessità di preservare l'ambiente spaziale e rispettare gli accordi internazionali, garantendo che lo spazio rimanga una risorsa condivisa per tutta l'umanità.

Un'altra iniziativa significativa, guidata dagli Stati Uniti, è rappresentata dagli Accordi Artemis, che mirano a promuovere la cooperazione internazionale nell'esplorazione lunare e oltre. Gli Accordi Artemis, che sono stati firmati da numerosi paesi, stabiliscono una serie di principi per l'esplorazione pacifica e sostenibile della Luna rappresentano un passo importante verso la costruzione di una comunità spaziale globale che opera in armonia e trasparenza. Uno dei principi cardine degli Accordi Artemis è la trasparenza. I firmatari si impegnano a condurre le loro attività spaziali in modo aperto e trasparente, condividendo informazioni sulle loro politiche e piani. Questo impegno è volto a costruire fiducia reciproca tra le nazioni partecipanti e a prevenire potenziali conflitti derivanti da malintesi o dalla mancanza di comunicazione. La trasparenza è considerata fondamentale per promuovere una collaborazione efficace e duratura nell'esplorazione spaziale. Un altro aspetto cruciale degli Accordi Artemis è la registrazione degli oggetti spaziali. Gli stati firmatari si impegnano a registrare tutti gli oggetti spaziali che lanciano, in conformità con la Convenzione sulla Registrazione del 1976. Questo obbligo facilita la tracciabilità e la responsabilità, garantendo che ogni oggetto spaziale possa essere identificato e monitorato. La registrazione è essenziale per la gestione e il coordinamento delle attività spaziali, nonché per prevenire la proliferazione di detriti spaziali (Asi.it, 2020). Gli Accordi Artemis

promuovono anche la compatibilità operativa dei sistemi spaziali. I firmatari sono incoraggiati a utilizzare standard comuni per garantire la sicurezza e l'efficienza delle operazioni spaziali. Questa compatibilità è fondamentale per facilitare la cooperazione tecnica e operativa tra le diverse nazioni e organizzazioni coinvolte nell'esplorazione dello spazio. L'adozione di standard comuni contribuisce a minimizzare i rischi e a massimizzare l'efficacia delle missioni spaziali internazionali. Un ulteriore principio degli Accordi Artemis riguarda l'assistenza di emergenza. I firmatari si impegnano a fornire assistenza agli astronauti in difficoltà, in linea con il Trattato sullo Spazio Extra-atmosferico e con la Convenzione sul Salvataggio del 1968. Questo impegno riflette i valori di solidarietà e cooperazione internazionale, assicurando che le missioni spaziali possano contare su un supporto reciproco in caso di emergenze. Gli Accordi Artemis rappresentano un quadro normativo innovativo e inclusivo che mira a promuovere un'esplorazione spaziale responsabile, trasparente e sostenibile. Essi sottolineano l'importanza della cooperazione internazionale e stabiliscono principi chiave per garantire che l'esplorazione della Luna e di altri corpi celesti avvenga in modo che benefici tutta l'umanità, rispettando al contempo l'ambiente spaziale. Questi accordi segnano un passo significativo verso la creazione di una comunità spaziale globale impegnata nella promozione della pace, della sicurezza e della sostenibilità nello spazio.

La gestione dei detriti spaziali rappresenta una delle sfide più critiche per la comunità internazionale impegnata nelle attività spaziali. Sebbene esista un consenso globale sull'importanza di mitigare i detriti, l'attuazione e il rispetto delle linee guida variano notevolmente tra le nazioni. Questa discrepanza è dovuta a fattori come capacità tecnologiche, risorse disponibili e priorità politiche. La cooperazione internazionale è cruciale per affrontare efficacemente questa problematica, con accordi globali come quelli promossi dall'Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) e dall'United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS). Tuttavia, l'efficacia di tali accordi dipende dall'adesione e dall'implementazione da parte dei paesi coinvolti. Misure più rigorose per la mitigazione, lo sviluppo di tecnologie di rimozione attiva, e l'educazione degli stakeholder sono essenziali per garantire la sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali e ridurre i rischi associati ai detriti.

3.3.3. Stakeholders

La gestione dei detriti spaziali dipende da un'azione concertata di vari stakeholders, ognuno dei quali apporta contributi distinti e significativi nel mitigare i detriti spaziali e promuovere pratiche responsabili. All'interno di questo elaborato ci si è concentrati su una selezione di stakeholder che include grandi imprese, piccole e medie imprese (PMI) e startup, istituzioni accademiche e di ricerca, agenzie spaziali, corpi internazionali e nazionali, e altre organizzazioni come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-atmosferico (UNOOSA). Di seguito si esplora come ciascuno di questi gruppi incide sul problema dei detriti:

- Grandi imprese: le grandi imprese, come SpaceX, Boeing, Lockheed Martin e Airbus, hanno un impatto significativo sulla sostenibilità spaziale attraverso la loro capacità di influenzare le politiche, sviluppare tecnologie avanzate e guidare le best practices nel settore. Queste imprese possono, da una parte, promuovere regolamentazioni più stringenti e partecipare attivamente ai processi decisionali internazionali e dall'altra, spinte dall'opinione pubblica, adottare loro stesse pratiche sostenibili per migliorare la loro immagine. A questo proposito, Airbus e Thales Alenia Space stanno sviluppando veicoli di servizio in orbita con funzioni di rimozione dei detriti, evidenziando il loro impegno verso la sostenibilità (ESA, 2020).
- Piccole e Medie Imprese e Startup: le PMI e le startup svolgono un ruolo vitale nel panorama della sostenibilità spaziale attraverso l'innovazione, l'agilità e l'adozione di pratiche sostenibili.

Molte PMI e startup nascono con un focus intrinseco sulla sostenibilità e inoltre meglio si adattano ai cambi di regolamentazioni, potendo scontare livelli di inerzia organizzativa diversi rispetto alle grandi imprese.

- Università e centri di ricerca: le università e i centri di ricerca sono fondamentali nel promuovere la sostenibilità spaziale attraverso la ricerca avanzata e la formazione. Il MIT e altre istituzioni conducono ricerche avanzate su tecnologie di mitigazione dei detriti e forniscono dati cruciali per lo sviluppo di politiche sostenibili. Inoltre, collaborano attivamente con industrie e agenzie spaziali per trasferire conoscenze e tecnologie, partecipando a progetti internazionali come il Clean Space Initiative dell'ESA, e forniscono consulenza scientifica e tecnica ai decisori politici e influenzano il dibattito pubblico attraverso pubblicazioni scientifiche, contribuendo allo sviluppo di regolamentazioni efficaci per la gestione dei detriti spaziali.
- Agenzie Spaziali e Corpi Internazionali e Nazionali: le agenzie spaziali nazionali, come NASA, ESA, JAXA, e i corpi internazionali, giocano un ruolo cruciale nella definizione delle politiche e nella promozione della sostenibilità spaziale. Queste agenzie sviluppano linee guida e regolamentazioni che influenzano il comportamento di tutti gli attori del settore spaziale, finanziano la ricerca e lo sviluppo di tecnologie di mitigazione dei detriti e promuovono progetti dimostrativi. NASA, per esempio, supporta progetti come il Restore-L per il rifornimento e la riparazione di satelliti in orbita. Le agenzie spaziali rivestono un ruolo fondamentale perché promuovono la collaborazione a livello internazionale al fine di armonizzare le regolamentazioni e condividere best practices (United Nations, Office for Outer Space Affairs, 2021). Altri enti rilevanti sono i Ministeri della Difesa: l'U.S. Space Command, ad esempio, monitora l'ambiente spaziale per prevenire collisioni e proteggere le risorse spaziali. La loro sorveglianza è cruciale per la gestione in tempo reale dei rischi associati ai detriti.

Altre organizzazioni: organizzazioni come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-atmosferico (UNOOSA) e altre entità non governative giocano un ruolo chiave nel promuovere la sostenibilità spaziale attraverso la sensibilizzazione, la definizione delle politiche e la collaborazione internazionale. Spesso si rendono protagoniste di campagne di sensibilizzazione per informare il pubblico e i decisori politici sull'importanza della sostenibilità spaziale. Questi sforzi aiutano a costruire un consenso globale e a spingere per l'adozione di misure più rigorose. Inoltre, si rivelano fondamentali nel facilitare la collaborazione tra diversi stakeholders e promuovere lo scambio di informazioni e best practices. La Secure World Foundation, ad esempio, lavora per promuovere la cooperazione internazionale sulla gestione dei detriti spaziali. Tra le altre organizzazioni rilevanti si segnala la Space Data Association (SDA) che facilita la condivisione dei dati tra operatori satellitari per migliorare la sicurezza e ridurre il rischio di collisioni e la International Telecommunication Union (ITU) che regola l'uso delle orbite geostazionarie e delle frequenze radio, assicurando che le orbite siano utilizzate in modo sostenibile e riducendo il rischio di collisioni grazie a una gestione ordinata delle risorse spaziali (United Nations, Office for Outer Space Affairs, 2021).

Stakeholders secondari, meritevoli di una menzione, sono le industrie assicurative che sviluppano polizze che coprono i rischi associati ai detriti spaziali, influenzando i comportamenti degli operatori attraverso requisiti di conformità e pratiche di mitigazione, e soprattutto la stessa società civile in cui viviamo. La crescente consapevolezza pubblica riguardo ai detriti spaziali spinge i governi e le aziende a prendere misure più rigorose per la sostenibilità e la pressione politica e mediatica è un motore importante per il cambiamento. Ciascuno di questi stakeholders, primari e non, influisce in modo significativo sulla sostenibilità spaziale attraverso le proprie azioni, politiche e innovazioni. La collaborazione e il coordinamento tra questi attori sono essenziali per affrontare efficacemente la sfida dei detriti spaziali e garantire un futuro sostenibile per le attività spaziali.

3.3.4. Analisi Criticità

Il questionario ha rivelato una serie di problematiche che ostacolano lo sviluppo sostenibile nell'ambito della gestione dei detriti spaziali e di politiche efficaci che la supportino. Le risposte degli esperti hanno evidenziato diverse criticità chiave che devono essere affrontate per migliorare la gestione dei detriti spaziali e promuovere la sostenibilità a lungo termine.

È emerso un eccessivo affidamento sulle iniziative nazionali, senza un'adeguata considerazione della necessità di collaborazioni internazionali. La mancanza di un approccio coordinato a livello globale limita l'efficacia delle politiche di sostenibilità, poiché i problemi legati ai detriti spaziali trascendono i confini nazionali. La collaborazione internazionale è cruciale per affrontare le sfide globali. La disparità nella severità delle policy tra diverse regioni del mondo crea disuguaglianze competitive. Alcune aree impongono regolamentazioni più stringenti rispetto ad altre, generando vantaggi e svantaggi competitivi non equi. Ad esempio, le regolamentazioni più severe in Europa possono svantaggiare le aziende europee rispetto a quelle operanti in regioni con norme meno stringenti. Gli esperti hanno osservato che spesso si tende a privilegiare la sperimentazione e l'innovazione tecnologica a scapito della sostenibilità. Questo atteggiamento evidenzia una mancanza di senso di urgenza nel voler effettivamente dare priorità alla sostenibilità, con il rischio di compromettere l'ambiente spaziale a lungo termine. Lo sviluppo di pratiche sostenibili procede a un ritmo molto inferiore rispetto allo sviluppo di nuove tecnologie per l'esplorazione spaziale. Questo squilibrio porta alla generazione di un elevato numero di detriti spaziali, poiché le misure di mitigazione non riescono a tenere il passo con il rapido avanzamento tecnologico. Le attuali regolamentazioni sono spesso raggirabili e mancano di strumenti efficaci per garantire il rispetto delle norme. Di fatto, spesso si adottano misure solo dopo il verificarsi di eventi critici. Questo approccio reattivo limita l'efficacia delle politiche di prevenzione e ritarda l'implementazione di misure proattive necessarie per evitare la generazione di detriti spaziali. La Secure World Foundation ha evidenziato l'importanza di una pianificazione proattiva per la sostenibilità spaziale (Secure World Foundation, 2020). Infine, i costi elevati associati alla rimozione dei detriti spaziali rappresentano una significativa barriera. Le operazioni di pulizia dello spazio richiedono ingenti risorse finanziarie, rendendo difficoltosa la loro attuazione su larga scala. Ad esempio, le iniziative di rimozione attiva dei detriti, come quelle intraprese da Astroscale, sono ancora in fase di sviluppo e presentano costi elevati (Astroscale, 2020).

Questa analisi fornisce una panoramica delle principali problematiche identificate dagli esperti, evidenziando le sfide che devono essere affrontate per sviluppare ed implementare politiche di sostenibilità spaziale efficaci entro il 2040. In linea con quanto riscontrato nei precedenti capitoli di questo elaborato si rivela essenziale colmare le lacune normative per bilanciare innovazione e sostenibilità e sviluppare strumenti efficaci per l'enforcement delle regolamentazioni. Solo attraverso un approccio coordinato e proattivo sarà possibile garantire un ambiente spaziale sostenibile per le future generazioni.

3.3.5. Analisi Mitigazione e Stakeholders

Dalle risposte raccolte tramite il questionario, emerge chiaramente che gli stakeholders ritenuti più importanti nella mitigazione dei detriti spaziali sono le agenzie spaziali e i corpi nazionali e internazionali, seguiti dalle grandi imprese private. Questa percezione si basa su una serie di

argomentazioni che evidenziano il ruolo cruciale e l'influenza di questi attori nel promuovere e implementare pratiche sostenibili nello spazio.

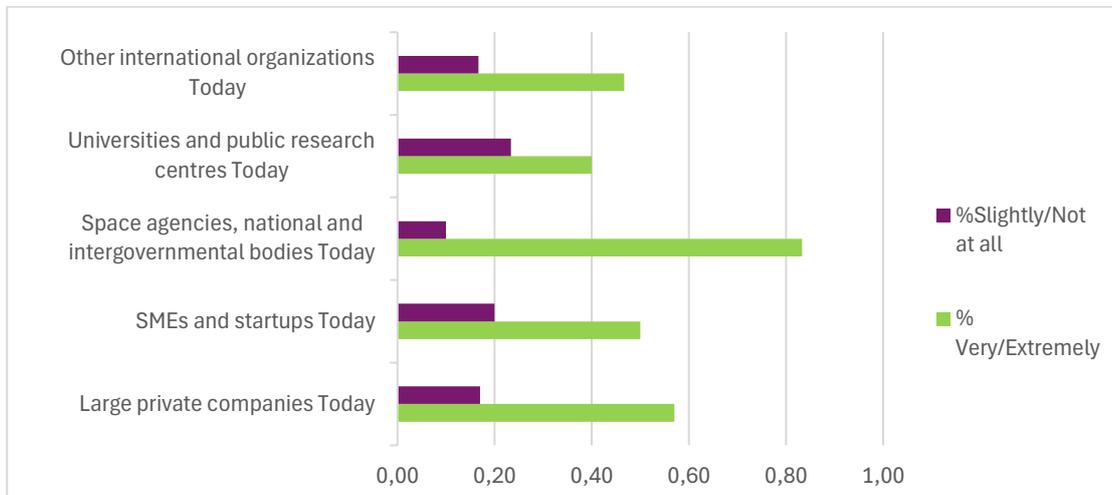


Figura 9: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi

Le agenzie spaziali e i corpi nazionali e internazionali sono considerate gli stakeholders più influenti nel settore spaziale per una serie di ragioni fondamentali che spaziano dall'autorità regolamentare al finanziamento della ricerca, dalla collaborazione internazionale alla promozione delle migliori pratiche. In primo luogo, queste agenzie possiedono un'autorità regolamentare significativa, che permette loro di definire e far rispettare le normative riguardanti la gestione dei detriti spaziali. Hanno il potere di emanare linee guida obbligatorie per la progettazione, il lancio e la gestione operativa dei satelliti, inclusi requisiti stringenti per la deorbitazione e la riduzione dei detriti. Questo potere normativo è cruciale per garantire che le attività spaziali siano condotte in maniera responsabile e sostenibile. Inoltre, le agenzie spaziali dispongono di risorse finanziarie notevoli per finanziare la ricerca e lo sviluppo di tecnologie avanzate per la mitigazione dei detriti spaziali. Esse supportano progetti di ricerca accademica e collaborano strettamente con il settore privato per sviluppare soluzioni innovative che affrontino il problema crescente dei detriti nello spazio. Questi investimenti non solo accelerano il progresso tecnologico, ma stimolano anche la creazione di nuove opportunità economiche e scientifiche. Un altro aspetto cruciale del ruolo delle agenzie spaziali è la loro capacità di facilitare la cooperazione internazionale. Essendo organizzazioni sovranazionali o intergovernative, queste agenzie sono in una posizione unica per promuovere accordi e trattati internazionali che standardizzano le pratiche sostenibili a livello globale. La gestione dei detriti spaziali è un problema di portata mondiale che richiede una risposta coordinata, e le agenzie spaziali sono essenziali per orchestrare questa cooperazione.

Le agenzie spaziali fungono inoltre da centri di eccellenza per la raccolta e la diffusione delle migliori pratiche in materia di sostenibilità spaziale. Attraverso conferenze, workshop e pubblicazioni, esse educano e influenzano gli altri attori del settore, promuovendo un approccio condiviso alla gestione sostenibile dello spazio. Questo ruolo educativo è fondamentale per elevare gli standard industriali e per garantire che le nuove generazioni di professionisti spaziali siano ben informate sulle pratiche sostenibili. Parallelamente alle agenzie spaziali, le grandi imprese private come SpaceX, Boeing, Lockheed Martin e Blue Origin sono considerate il secondo gruppo di stakeholders più influenti nel

settore. La loro importanza deriva principalmente dalla loro capacità di innovazione tecnologica, dalle risorse finanziarie di cui dispongono, dal loro impatto sul mercato e dalle collaborazioni pubblico-private. Queste aziende sono all'avanguardia nell'innovazione tecnologica e nella commercializzazione dello spazio. Sviluppano nuove tecnologie che possono ridurre la creazione di detriti spaziali, come satelliti progettati per l'autodeorbitazione o veicoli per la rimozione attiva dei detriti. Le grandi imprese dispongono di capitali considerevoli per investire in ricerca e sviluppo di soluzioni sostenibili. Questo accesso a risorse finanziarie significative permette loro di finanziare progetti ambiziosi e costosi che le piccole e medie imprese (PMI) e le startup non potrebbero permettersi. Inoltre, essendo i principali operatori del settore spaziale, le decisioni e le pratiche adottate da queste aziende hanno un impatto significativo sul mercato. L'adozione di pratiche sostenibili da parte di questi giganti industriali può influenzare positivamente l'intero settore, stabilendo nuovi standard industriali e promuovendo una cultura di sostenibilità. Infine, le grandi imprese collaborano frequentemente con agenzie spaziali e governi per sviluppare e implementare programmi di sostenibilità. Queste partnership pubblico-private sono cruciali per la realizzazione di progetti su larga scala, che richiedono non solo risorse finanziarie ingenti, ma anche competenze tecniche avanzate e una coordinazione efficace tra vari attori del settore. Tali collaborazioni facilitano l'integrazione delle innovazioni tecnologiche nei programmi spaziali nazionali e internazionali, contribuendo a creare un ecosistema spaziale più sostenibile e responsabile.

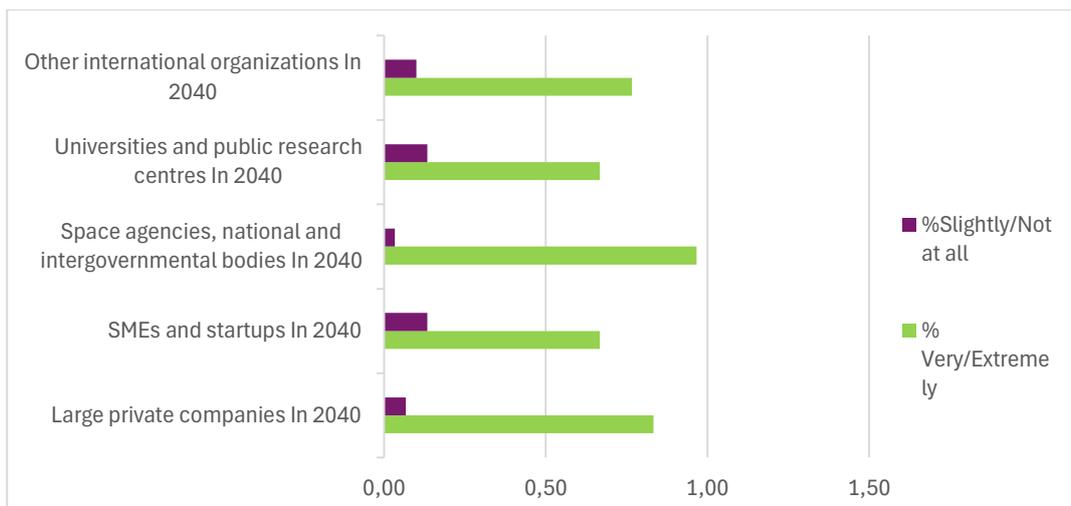


Figura 10: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040

La situazione, secondo gli esperti, cambierà di poco entro il 2040: si prevede che tutti gli stakeholders sopra menzionati diventeranno ancora più importanti e tutti quasi in egual misura. Questa evoluzione è dovuta al crescente riconoscimento dell'urgenza di affrontare il problema dei detriti spaziali in modo collaborativo e sostenibile. Si ritiene che le grandi imprese private continueranno a guidare l'innovazione tecnologica, ma lavoreranno sempre più a stretto contatto con le agenzie spaziali e le università per garantire che queste innovazioni siano sostenibili. Le università e i centri di ricerca manterranno un ruolo di primo piano nella formazione degli esperti e nello sviluppo di nuove conoscenze e tecnologie. La loro collaborazione e il loro impegno congiunto saranno essenziali per sviluppare e implementare soluzioni sostenibili che affrontino efficacemente questa crescente minaccia.

In conclusione, le agenzie spaziali e i corpi nazionali e internazionali, insieme alle grandi imprese private, giocano un ruolo fondamentale nel plasmare il futuro delle attività spaziali. La loro influenza si estende dalla regolamentazione e finanziamento alla promozione delle migliori pratiche e alla cooperazione internazionale, creando un quadro operativo che promuove la sostenibilità e l'innovazione nel settore spaziale. L'analisi delle risposte al questionario indica chiaramente che la combinazione di autorità regolamentare, capacità di finanziamento, potere di innovazione e influenza sul mercato rende le agenzie spaziali e i corpi internazionali/nazionali, insieme alle grandi imprese private, gli stakeholders più importanti nella mitigazione dei detriti spaziali. Il loro ruolo è essenziale non solo per la creazione di politiche e normative efficaci, ma anche per la promozione di una cultura di sostenibilità nel settore spaziale.

3.4. Access to space

3.4.1. Introduzione

La quarta sezione del questionario si concentra sull'accesso allo spazio e sulle criticità più rilevanti associate a questo ambito. L'obiettivo di questo capitolo è analizzare le opinioni degli esperti del settore, raccolte attraverso il questionario, riguardo alle problematiche più significative che ostacolano lo sviluppo sostenibile del settore spaziale. Parallelamente, il capitolo si propone di esaminare l'importanza e l'influenza dei principali stakeholders nel supportare e implementare nuove tecnologie.

L'accesso indipendente, affidabile ed economico allo spazio è una priorità politica e strategica per l'Unione Europea (UE). Questo obiettivo è cruciale non solo per garantire la sovranità tecnologica e decisionale dell'UE, ma anche per supportare una serie di iniziative economiche, scientifiche e di sicurezza. La Space Strategy for Europe (COM(2016)705) sottolinea l'importanza di mantenere un accesso autonomo allo spazio per assicurare l'implementazione dei programmi spaziali dell'UE, come Galileo e Copernicus, e per sostenere i progetti di ricerca finanziati dai Programmi Quadro di Ricerca dell'Unione Europea (European Commission, 2022).

Il settore spaziale ha effetti positivi su tutta l'economia, contribuendo alla creazione di posti di lavoro, alla crescita economica e alla sicurezza dell'UE. Secondo l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), ogni euro investito nello spazio genera un ritorno economico multiplo, stimolando innovazioni tecnologiche che si riversano su altri settori industriali. Per garantire la sostenibilità economica dell'accesso allo spazio però, l'industria spaziale europea deve essere competitiva a livello globale. Pertanto, è indispensabile che l'industria europea si appoggi a un mercato commerciale globale per assicurare la domanda necessaria e mantenere la competitività. La Commissione Europea, in coordinamento con l'ESA, ha l'obiettivo di promuovere capacità di trasporto spaziale che siano affidabili, efficienti, accessibili, innovative e competitive. L'UE, a questo proposito, ha riconosciuto l'importanza della ricerca e dell'innovazione per rafforzare la competitività dell'industria spaziale europea. Attraverso iniziative come il premio per l'accesso a basso costo allo spazio lanciato nel 2018, l'UE stimola lo sviluppo di nuove tecnologie e soluzioni innovative per il lancio di satelliti leggeri (European Commission, 2022). Inoltre, il supporto continuo alla digitalizzazione e allo sviluppo di nuovi concetti come la riusabilità e il servicing in-orbit sono fondamentali per mantenere l'industria europea all'avanguardia. L'ambizione dell'UE è di agire come un cliente intelligente per soluzioni di lancio affidabili ed economiche prodotte in Europa. Nei prossimi 10-15 anni, l'UE prevede di lanciare più di 30 satelliti per le infrastrutture spaziali Galileo e Copernicus, utilizzando i nuovi lanciatori europei Ariane 6 e Vega C. Questo impegno non solo rafforza l'autonomia spaziale dell'Europa, ma contribuisce anche agli obiettivi di sostenibilità e innovazione tecnologica (European Commission, 2022).

Di fatto, l'accesso allo spazio rappresenta una delle sfide più complesse e cruciali per l'industria spaziale europea. La competizione globale nel settore dei lanciatori spaziali sta diventando sempre più intensa e in questo contesto l'Europa deve affrontare una serie di problematiche per mantenere e potenziare la propria autonomia e capacità tecnologica nello spazio. A questo proposito scriveva Jean Pierre Darnis nel 2019. Si analizzano alcune delle principali questioni emerse e le possibili strategie per affrontarle:

- Importanza strategica dei lanciatori Ariane e Vega: i lanciatori Ariane e Vega rappresentano i pilastri fondamentali dell'industria spaziale europea. Ariane 5, con una serie impressionante di 82 lanci di successo, ha consolidato la fiducia dei clienti grazie alla sua affidabilità. Allo stesso modo, il lanciatore Vega ha dimostrato elevate prestazioni con 11 lanci riusciti, rafforzando la leadership italiana nel settore della propulsione solida.

- Concorrenza e sostenibilità economica: una delle principali sfide per l'Europa è la concorrenza agguerrita proveniente dagli Stati Uniti, in particolare da SpaceX, che può offrire servizi di lancio a prezzi significativamente inferiori grazie ai finanziamenti pubblici sostanziosi e agli investimenti privati. SpaceX, ad esempio, è in grado di proporre servizi di lancio commerciali a circa la metà del costo rispetto ai prezzi del mercato pubblico statunitense. Questa dinamica pone l'Ariane 5 in una posizione competitiva difficile, spingendo l'Europa a sviluppare il nuovo lanciatore Ariane 6, che mira a ridurre drasticamente i costi mantenendo un elevato livello di affidabilità (Darnis, 2018).
- Politiche di finanziamento pubblico e collaborazione: il modello di business dei lanciatori spaziali è storicamente sostenuto dai bisogni governativi. La viabilità commerciale in questi settori sarebbe impossibile senza un forte supporto pubblico diretto o indiretto, come l'acquisto di un gran numero di lanciatori per payload istituzionali. Per affrontare questa sfida, è fondamentale che l'Europa adotti un approccio simile a quello degli Stati Uniti, della Russia e della Cina, garantendo impegni governativi per l'acquisto di lanciatori europei e stabilendo un numero minimo di lanci annuali per Ariane 6 e Vega C. Questa strategia non solo aiuterebbe a livellare il campo di gioco ma fornirebbe anche una base per ammortizzare gli investimenti e mantenere competitivi tecnologia e prezzi.
- Sostenibilità ambientale e propellenti green: un'altra area critica è la sostenibilità ambientale. L'industria spaziale europea deve affrontare la sfida di sviluppare propellenti più sostenibili e tecnologie di lancio riutilizzabili. Sebbene la riusabilità dei razzi sia stata dimostrata con successo da SpaceX, l'Europa deve ancora compiere passi significativi in questa direzione. L'adozione di propellenti green, come il propano liquido e il perossido di idrogeno, rappresenta un'importante opportunità per ridurre l'impatto ambientale dei lanci spaziali, anche se restano numerosi ostacoli tecnici e di efficienza da superare.
- Autonomia spaziale e governance dei dati: l'accesso autonomo allo spazio è essenziale non solo per mantenere la sovranità tecnologica europea ma anche per garantire una governance adeguata sulla catena del valore dei dati moderni. Le applicazioni satellitari per l'osservazione della Terra, il posizionamento e le telecomunicazioni sono sempre più integrate in catene di dati a valore aggiunto, dove grandi aziende di Internet forniscono prodotti basati sulla fusione dei dati. Questo legame tra capacità di lancio e dati satellitari è così importante che le principali aziende globali di Internet stanno investendo in costellazioni di satelliti, dimostrando come il mercato stia evolvendo.

Per affrontare efficacemente queste sfide, l'Europa deve adottare una strategia integrata che promuova l'innovazione tecnologica, la sostenibilità ambientale e la collaborazione internazionale. Sviluppare lanciatori competitivi come Ariane 6 e Vega C, investire in propellenti green e tecnologie riutilizzabili, e garantire un forte supporto pubblico sono passi essenziali per rafforzare la posizione dell'Europa nell'industria spaziale globale. Solo attraverso un impegno concertato e una visione a lungo termine, l'Europa potrà mantenere la propria autonomia spaziale e continuare a svolgere un ruolo di primo piano nella governance dei dati globali (Darnis, 2018).

A livello internazionale, l'iniziativa "Accesso allo spazio per tutti", promossa dall'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-Atmosferico (UNOOSA), rappresenta un importante sforzo per democratizzare la tecnologia spaziale e le sue applicazioni. Il programma è progettato per assistere gli Stati membri delle Nazioni Unite, specialmente quelli con programmi spaziali emergenti o limitato accesso alle risorse spaziali, nell'utilizzo e nello sviluppo della tecnologia spaziale.

L'obiettivo principale dell'iniziativa è migliorare le capacità nazionali nel campo della scienza e della tecnologia spaziale. Ciò avviene attraverso l'implementazione di esperienze pratiche come lo sviluppo di satelliti e l'analisi dei dati spaziali. Inoltre, l'iniziativa offre piattaforme per la ricerca e lo sviluppo, consentendo agli istituti di ricerca nei paesi in via di sviluppo di condurre esperimenti scientifici spaziali. Un'altra componente fondamentale dell'iniziativa è la promozione della cooperazione internazionale. Questo si traduce in partenariati strategici con agenzie spaziali consolidate, enti del settore privato e istituzioni accademiche. Tali collaborazioni facilitano il trasferimento di conoscenze e tecnologie spaziali, nonché l'accesso a risorse cruciali come piattaforme di lancio e formazione tecnica. L'iniziativa si propone anche di sostenere lo sviluppo sostenibile attraverso l'uso della tecnologia spaziale per monitorare e affrontare le sfide globali e ambientali. Questo include la gestione dei trasferimenti tecnologici in modo sicuro e sostenibile, bilanciando contemporaneamente i diversi interessi delle parti coinvolte (Panoramica dell'iniziativa "Accesso allo spazio per tutti", s.d.). In sintesi, l'iniziativa "Accesso allo spazio per tutti" non solo mira a colmare il divario tra nazioni con capacità spaziali avanzate e quelle in via di sviluppo, ma anche a promuovere un uso pacifico e collaborativo dello spazio. Rappresenta un passo significativo verso l'uso equo e responsabile della tecnologia spaziale per il progresso globale e il benessere dell'umanità.

3.4.2. Stakeholders

L'accesso allo spazio rappresenta un ramo trasversale all'interno del panorama economico spaziale e pertanto incrocia una grande varietà di stakeholders, ognuno dei quali apporta contributi distinti e significativi.

Il quadro delle dinamiche del settore spaziale rivela come i diversi gruppi di attori contribuiscano in modo significativo all'innovazione, alla competitività e alla crescita economica. In primo luogo, le grandi imprese come SpaceX, Blue Origin, Boeing e Airbus Defence and Space svolgono un ruolo cruciale nell'avanzamento tecnologico e nella competitività del settore. Queste aziende sono spesso all'avanguardia nello sviluppo di tecnologie avanzate, tra cui razzi riutilizzabili, sistemi di lancio innovativi e soluzioni per la riduzione dei costi. Il loro impegno costante nella ricerca e nello sviluppo è volto a migliorare le capacità di accesso allo spazio, con particolare attenzione alla riusabilità dei razzi, ai sistemi di propulsione più efficienti e alle tecnologie per la riduzione dei detriti spaziali. Come già sottolineato all'interno di questo elaborato, la capacità di queste grandi imprese di generare crescita economica è considerevole, grazie agli investimenti diretti che effettuano, alla creazione di posti di lavoro altamente qualificati e allo sviluppo di ecosistemi industriali e tecnologici correlati. Il loro ruolo di leader tecnologici non solo stimola l'innovazione, ma favorisce anche una maggiore efficienza e competitività del settore spaziale nel suo complesso. In questo contesto, le grandi imprese rappresentano una forza trainante per l'industria spaziale globale, promuovendo la crescita e l'evoluzione del settore attraverso investimenti significativi e l'introduzione di tecnologie all'avanguardia. Accanto a queste grandi imprese, le piccole e medie imprese (PMI) e le start-up offrono un contributo fondamentale, introducendo innovazioni agili e flessibili. Spesso operando in segmenti di mercato diversi rispetto ai grandi attori, queste PMI e start-up portano soluzioni innovative e tecnologie disruptive che possono rivoluzionare il settore. Tra le innovazioni più significative vi sono i micro-lanciatori, i servizi di in-orbit servicing e le applicazioni satellitari specializzate. Grazie alla loro struttura più snella e alla minor dipendenza da processi burocratici, queste aziende sono in grado di rispondere rapidamente alle esigenze emergenti del mercato, migliorando la competitività complessiva del settore.

La flessibilità e l'agilità delle PMI e delle start-up consentono loro di adattarsi rapidamente ai cambiamenti del mercato e di sperimentare nuove tecnologie con un rischio inferiore rispetto alle grandi imprese. Questa capacità di innovare rapidamente e di introdurre nuove soluzioni tecniche è cruciale per mantenere il settore spaziale all'avanguardia della tecnologia globale. Inoltre, il loro approccio innovativo spesso funge da catalizzatore per l'intero settore, stimolando ulteriori sviluppi tecnologici e promuovendo una cultura di continua innovazione. Le agenzie spaziali, come la NASA negli Stati Uniti e l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) in Europa, svolgono un ruolo cruciale nello sviluppo e nella regolamentazione delle attività spaziali. La loro influenza si manifesta principalmente attraverso la guida tecnologica e normativa, il finanziamento e il supporto, nonché la promozione della cooperazione internazionale. In primo luogo, queste agenzie definiscono le politiche e le normative che orientano lo sviluppo tecnologico e operativo nello spazio. Queste direttive sono fondamentali per assicurare che le attività spaziali siano condotte in maniera sicura, sostenibile e conforme agli standard internazionali. La regolamentazione rigorosa contribuisce a mitigare i rischi associati all'esplorazione spaziale e garantisce che le missioni siano eseguite nel rispetto delle leggi internazionali. In termini di finanziamento e supporto, le agenzie spaziali forniscono risorse significative per la ricerca, lo sviluppo e l'implementazione di missioni spaziali critiche. Ad esempio, in Europa, programmi come Galileo e Copernicus sono stati resi possibili grazie al sostegno finanziario dell'ESA, mentre negli Stati Uniti il programma Artemis, volto a riportare l'uomo sulla Luna, è sostenuto dalla NASA. Questi finanziamenti non solo facilitano l'avanzamento della scienza e della tecnologia spaziale, ma stimolano anche l'industria spaziale commerciale, creando opportunità di collaborazione tra enti pubblici e privati. La cooperazione internazionale è un altro pilastro fondamentale del ruolo delle agenzie spaziali. Esse promuovono trattati e accordi multilaterali che mirano a gestire risorse condivise, come le orbite spaziali, e a ridurre i detriti spaziali. La cooperazione internazionale facilita la condivisione delle conoscenze, delle tecnologie e delle risorse, permettendo di affrontare in maniera collettiva le sfide globali poste dall'esplorazione spaziale. Le agenzie spaziali lavorano insieme per garantire che lo spazio sia utilizzato in modo pacifico e che i benefici delle attività spaziali siano condivisi equamente tra tutte le nazioni. Parallelamente, organizzazioni internazionali come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-atmosferico (UNOOSA) svolgono un ruolo importante nella promozione della cooperazione globale e nella definizione di norme e linee guida internazionali per le attività spaziali. Uno dei loro principali impatti consiste nella definizione e nella promozione di normative internazionali volte a garantire la sicurezza e la sostenibilità delle attività spaziali. Queste norme facilitano la cooperazione tra paesi e organizzazioni, creando un quadro comune di riferimento per la conduzione delle operazioni spaziali. UNOOSA facilita anche il dialogo tra le nazioni su questioni critiche come la gestione dei detriti spaziali, la sicurezza delle missioni e l'uso responsabile dello spazio extra-atmosferico. Questo dialogo è essenziale per affrontare le preoccupazioni globali e per sviluppare soluzioni collaborative a problemi che nessun singolo paese potrebbe risolvere da solo. Promuovendo il dialogo e la cooperazione, UNOOSA contribuisce a creare un ambiente di fiducia e collaborazione internazionale. Inoltre, UNOOSA supporta la governance globale dello spazio, contribuendo a stabilire un quadro giuridico internazionale per regolare le attività spaziali. Questo quadro giuridico è essenziale per garantire che lo spazio rimanga un bene comune globale, accessibile e utilizzabile in maniera responsabile da tutte le nazioni. Le attività di governance di UNOOSA aiutano a prevenire conflitti e a promuovere l'uso pacifico dello spazio, assicurando che i benefici derivanti dall'esplorazione spaziale siano equamente distribuiti.

In conclusione, le agenzie spaziali e le organizzazioni internazionali come UNOOSA svolgono un ruolo fondamentale nello sviluppo e nella regolamentazione delle attività spaziali. Attraverso la guida tecnologica e normativa, il finanziamento e il supporto, e la promozione della cooperazione internazionale, queste entità contribuiscono in modo significativo al progresso sostenibile dell'esplorazione spaziale. La loro collaborazione e il loro impegno per la sicurezza, la sostenibilità e la

conformità internazionale sono essenziali per garantire che lo spazio continui a essere una frontiera di opportunità e benefici per tutta l'umanità. Ogni stakeholder nel settore dell'accesso allo spazio ha un ruolo unico e complementare nel promuovere la sostenibilità, l'innovazione e la competitività globale. Il successo futuro del settore dipende dalla collaborazione efficace tra tutti questi attori, bilanciando obiettivi commerciali con responsabilità sociale e ambientale per garantire un accesso sostenibile e benefico allo spazio per tutte le nazioni e le generazioni future.

3.4.3. Analisi

L'analisi delle risposte e i giudizi raccolti tramite il questionario ha fornito una panoramica circa le percezioni attuali e le aspettative future riguardo allo sviluppo di tecnologie spaziali sostenibili nell'ambito dell'accesso allo spazio. Quest'ultimo rappresenta una sfida cruciale e complessa per l'economia spaziale, con una serie di problematiche che emergono chiaramente dalle risposte del questionario. La riusabilità dei razzi, lo sviluppo di propellenti green, la riduzione dei costi di lancio, la collaborazione tra vari enti e una maggiore comprensione degli effetti ambientali sono tutte aree cruciali per migliorare l'accesso allo spazio in modo sostenibile e efficiente:

- Riusabilità: la riusabilità dei razzi è di sicuro il tema maggiormente ridondante nelle risposte dei partecipanti al questionario. SpaceX, con il suo razzo Falcon 9, ha dimostrato che il riutilizzo può ridurre significativamente i costi di lancio. L'obiettivo è di rendere lo spazio accessibile come mai prima d'ora grazie alla riusabilità dei razzi. Tuttavia, lo sviluppo di sistemi completamente riutilizzabili è ancora complesso e costoso, e molte aziende spaziali faticano a raggiungere questo obiettivo. L'industria spaziale sta cercando alternative più sostenibili ai propellenti chimici tradizionali. I propellenti green, come il propano liquido e il perossido di idrogeno, offrono potenziali benefici ambientali, ma devono ancora superare numerosi ostacoli tecnici e di efficienza. La ricerca in questo campo è essenziale per ridurre l'impatto ambientale dei lanci spaziali.
- Costi elevati per il lancio di payloads: i costi di lancio sono uno degli ostacoli principali per l'accesso allo spazio. L'industria deve affrontare spese elevate per mettere in orbita i payloads, che rappresentano una porzione significativa del budget delle missioni spaziali. Secondo uno studio di McKinsey, il costo di lancio per kg è uno dei fattori determinanti nella sostenibilità economica delle missioni spaziali. La preferenza per la costruzione di mezzi più potenti per esplorare orbite più distanti a volte porta a trascurare soluzioni più sostenibili e convenienti.
- Collaborazione tra agenzie, centri di ricerca e private companies: la mancanza di coordinazione tra agenzie spaziali, centri di ricerca e compagnie private è un problema significativo, soprattutto in Europa. Una maggiore collaborazione potrebbe portare a un sistema di traffico spaziale più integrato ed efficiente. L'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha sottolineato l'importanza della cooperazione internazionale per affrontare le sfide comuni e ottimizzare l'uso delle risorse spaziali.
- Conoscenza dell'effetto dei lanci sull'atmosfera: gli effetti ambientali dei lanci spaziali sull'atmosfera sono una preoccupazione crescente. I razzi emettono gas serra e particolato che possono influenzare negativamente il clima terrestre. Studi recenti hanno evidenziato la necessità di una maggiore comprensione e monitoraggio di questi effetti per sviluppare tecnologie di lancio più sostenibili. La comunità scientifica sta lavorando per ottenere dati più accurati e proporre soluzioni che minimizzino l'impatto ambientale.

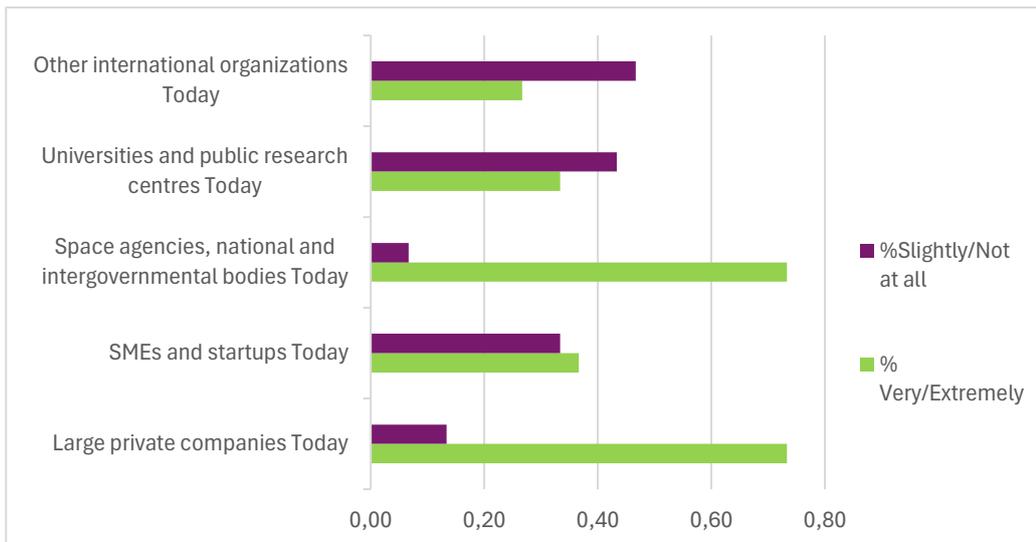


Figura 11: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi

Dall'analisi delle risposte del questionario, emerge chiaramente che gli stakeholder più influenti nello sviluppo di pratiche sostenibili nell'accesso allo spazio sono le agenzie spaziali e i corpi nazionali e internazionali, seguiti dalle grandi imprese private. Al contrario, stakeholder come i centri accademici e di ricerca e organizzazioni come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-atmosferico (UNOOSA) sembrano avere un'influenza limitata. In questa sezione si analizzano le ragioni di questa dinamica e le implicazioni per il futuro dello sviluppo sostenibile nello spazio.

Le agenzie spaziali come l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), la NASA e altre agenzie nazionali svolgono un ruolo cruciale nella definizione delle politiche e delle pratiche relative all'accesso allo spazio. Queste istituzioni sono spesso i principali finanziatori e i driver delle missioni spaziali, e quindi hanno la capacità di influenzare significativamente la direzione dello sviluppo tecnologico e delle pratiche operative. Per esempio, l'ESA ha avviato numerosi progetti per migliorare la sostenibilità delle missioni spaziali, come lo sviluppo di tecnologie per la mitigazione dei detriti spaziali e l'uso di propellenti green (Stockley, 2023). I governi e le organizzazioni internazionali come l'Unione Europea (UE) e le Nazioni Unite stabiliscono normative e politiche che influenzano direttamente le attività spaziali. L'UE, attraverso la sua Strategia Spaziale per l'Europa, ha posto l'accento sull'importanza di un accesso allo spazio indipendente e sostenibile. Le politiche governative e i trattati internazionali, come il Trattato sullo Spazio Extra-atmosferico, forniscono un quadro normativo che guida le attività spaziali verso obiettivi sostenibili. Le grandi imprese private, come SpaceX e Blue Origin, stanno emergendo come attori chiave nello sviluppo delle tecnologie spaziali. Queste aziende hanno portato avanti innovazioni significative, come i razzi riutilizzabili, che hanno il potenziale di ridurre i costi e l'impatto ambientale dei lanci spaziali. SpaceX, per esempio, ha dimostrato con successo la riusabilità del razzo Falcon 9, riducendo i costi di lancio e contribuendo alla sostenibilità economica delle missioni spaziali (Stockley, 2023). Tuttavia, le priorità di queste aziende sono spesso guidate da considerazioni commerciali piuttosto che da obiettivi di sostenibilità, il che può limitare il loro impegno verso pratiche sostenibili a meno che non vi siano incentivi regolatori o di mercato.

Nonostante la loro importanza nella generazione di conoscenze e innovazioni, i centri accademici e di ricerca sembrano avere un'influenza limitata sulle pratiche sostenibili nello spazio. Questa limitata influenza può essere attribuita a diversi fattori che meritano un'analisi approfondita. In primo luogo, i finanziamenti e le risorse rappresentano una barriera significativa. Le università e i centri di ricerca spesso operano con budget limitati rispetto alle agenzie spaziali e alle grandi imprese private. Questa

disparità finanziaria riduce la capacità delle istituzioni accademiche di sviluppare e implementare nuove tecnologie su larga scala. Mentre le grandi imprese e le agenzie governative possono investire ingenti somme in ricerca e sviluppo, i centri accademici devono spesso fare affidamento su sovvenzioni e fondi competitivi, che sono limitati e insufficienti per sostenere progetti ambiziosi e di lungo termine. Questo squilibrio finanziario limita il potenziale delle università di contribuire significativamente alle pratiche sostenibili nello spazio. In secondo luogo, il trasferimento tecnologico rappresenta un'altra sfida cruciale. Sebbene i centri di ricerca siano fondamentali per l'innovazione tecnologica, il processo di trasferimento di queste tecnologie dall'ambito accademico a quello industriale può essere lento e complesso. Le tecnologie sviluppate nei laboratori universitari spesso richiedono ulteriori sviluppi e investimenti per diventare praticabili a livello commerciale. Questo processo di maturazione tecnologica, noto come valle della morte, rappresenta un ostacolo significativo. Le imprese private possono essere riluttanti a investire in tecnologie non ancora provate su larga scala, e le università possono non avere le risorse necessarie per portare queste innovazioni fino al punto di essere pronte per il mercato. Questo rallenta il progresso delle tecnologie sostenibili e limita l'impatto che le istituzioni accademiche possono avere sulle pratiche spaziali. Infine, l'impatto politico delle università e dei centri di ricerca è spesso inferiore rispetto a quello delle agenzie governative e delle grandi imprese private. Le decisioni politiche e regolatorie nel settore spaziale sono spesso guidate da considerazioni economiche e strategiche che privilegiano gli attori con maggiori risorse e capacità operative. Le università e i centri di ricerca, pur essendo fonti cruciali di innovazione e competenza tecnica, hanno meno influenza diretta sulle politiche spaziali. Le loro raccomandazioni e i loro contributi scientifici possono essere ignorati o sottovalutati in favore di interessi economici più immediati. Questo limita ulteriormente la capacità delle istituzioni accademiche di promuovere pratiche sostenibili e di influenzare le decisioni strategiche nel settore spaziale.

Evidentemente, i centri accademici e di ricerca devono affrontare numerose sfide che ne limitano l'influenza sulle pratiche sostenibili nello spazio. I limitati finanziamenti e risorse, le difficoltà nel trasferimento tecnologico e l'impatto politico ridotto rispetto alle agenzie governative e alle grandi imprese private sono fattori che contribuiscono a questa limitata influenza. Per migliorare la loro capacità di contribuire alle pratiche sostenibili nello spazio, è necessario affrontare queste sfide attraverso un maggiore sostegno finanziario, facilitando il trasferimento tecnologico e riconoscendo l'importanza delle istituzioni accademiche nelle decisioni politiche e regolatorie. Per promuovere ulteriormente la sostenibilità nello spazio, è essenziale rafforzare la collaborazione tra questi diversi stakeholder, incentivare l'innovazione e implementare politiche che bilancino le esigenze economiche con gli obiettivi di sostenibilità. L'UNOOSA e altre organizzazioni internazionali svolgono un ruolo importante nel promuovere la cooperazione internazionale e stabilire norme globali per le attività spaziali. Tuttavia, la loro influenza pratica sulle decisioni quotidiane relative allo sviluppo tecnologico e operativo è limitata. Sebbene l'UNOOSA promuova attivamente la sostenibilità e la sicurezza spaziale, l'implementazione effettiva di queste raccomandazioni dipende dalla volontà dei singoli stati e delle loro agenzie spaziali (Stockley, 2023)

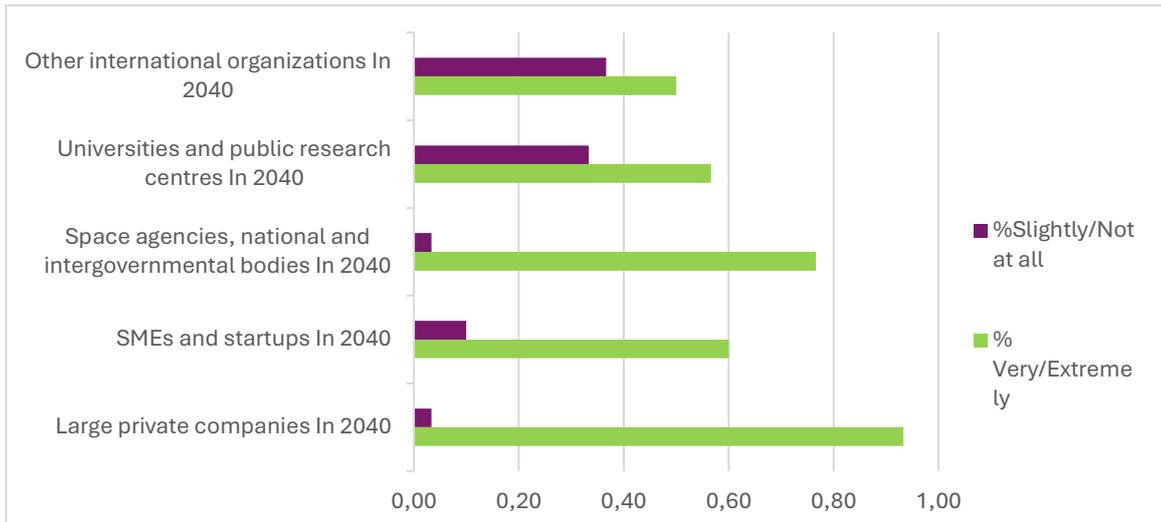


Figura 12: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040

Entro il 2040, si prevede un maggiore equilibrio nell'influenza degli stakeholder nel settore dell'accesso allo spazio, con l'unica eccezione di una crescita importante per le grandi imprese private. Queste aziende sono leader nell'innovazione e nello sviluppo di tecnologie avanzate nel settore dell'accesso allo spazio, concentrando i loro sforzi su razzi riutilizzabili, sistemi di lancio avanzati e soluzioni per la riduzione dei costi. Queste aziende sono motore di creazione di posti di lavoro altamente qualificati e favoriscono lo sviluppo di ecosistemi industriali e tecnologici correlati. Il loro impegno continuo nel settore promuove l'innovazione tecnologica e sostiene l'espansione delle attività spaziali commerciali e scientifiche. Con il costante miglioramento delle loro capacità e l'espansione delle loro operazioni, queste aziende sono destinatarie di un interesse crescente nel panorama spaziale. Il loro ruolo chiave nel promuovere la sostenibilità economica e tecnologica nello spazio le rende stakeholder cruciali nel futuro dell'accesso allo spazio.

3.5. Remote sensing and data handling

3.5.1. Introduzione

La quinta sezione del questionario si concentra sulle tecnologie di remote sensing (telerilevamento) e data handling (gestione dei dati) e sulle sue criticità più rilevanti. Il capitolo vuole valutare le opinioni degli esperti del settore, raccolte attraverso il questionario, circa le problematiche più significative che ostacolano lo sviluppo sostenibile di queste tecnologie entro il 2040. Parallelamente, il capitolo si focalizzerà sull'importanza e l'influenza degli stakeholders principali nel supporto e nell'implementazione delle nuove tecnologie. Attraverso questa analisi, si intende offrire una visione complessiva e dettagliata delle dinamiche che regolano il settore e delle possibili soluzioni per un futuro spaziale più sostenibile.

Il (telerilevamento) e le attività gestione dei dati sono componenti cruciali della space economy. Il telerilevamento si riferisce alla raccolta di dati e informazioni sulla superficie terrestre e l'atmosfera tramite sensori a bordo di satelliti o aerei. Questi sensori possono rilevare diversi tipi di radiazioni elettromagnetiche, come la luce visibile, l'infrarosso e le microonde e trovano applicazione in una serie di campi: agricoltura di precisione con il monitoraggio delle colture, l'analisi della salute delle piante e la gestione delle risorse idriche, il monitoraggio ambientale con il controllo della deforestazione, gestione delle risorse naturali e monitoraggio delle aree protette, la gestione dei disastri naturali e l'urbanistica. La gestione dei dati si riferisce all'acquisizione, elaborazione, archiviazione e distribuzione dei dati raccolti dai satelliti e altri strumenti di telerilevamento. Ad una prima fase di raccolta dei dati grezzi dai sensori satellitari segue la conversione dei dati in formati utilizzabili tramite algoritmi e tecniche di elaborazione immagini. Infine, si ha la memorizzazione dei dati in un database per consentirne l'accesso e l'analisi futuri e la condivisione con gli utenti finali, ricercatori e altre organizzazioni tramite piattaforme online e servizi cloud (Guedes, 2024). Di seguito si osservino nel dettaglio le principali applicazioni di questo tipo di tecnologie:

- Agricoltura: i dati satellitari ottimizzano le rese delle colture monitorando fattori come l'umidità del suolo e la salute delle colture, permettendo agli agricoltori di prendere decisioni informate su irrigazione, fertilizzazione e controllo dei parassiti, aumentando la produttività e riducendo l'uso delle risorse.
- Imaging globale: aziende come Maxar Technologies forniscono immagini satellitari e piattaforme analitiche che supportano le industrie nel monitoraggio di vari aspetti della Terra. Airbus Defense and Space collabora con Maxar Technologies per migliorare le capacità di imaging globale attraverso progetti satellitari. La Banca Mondiale utilizza l'esperienza di Maxar nelle immagini satellitari per la gestione del rischio di disastri e la pianificazione delle infrastrutture, mentre giganti minerari come Rio Tinto si affidano alle soluzioni di Maxar per ottimizzare l'esplorazione e monitorare gli impatti ambientali.
- Connettività: oggi costellazioni di piccoli satelliti in orbita bassa stanno trasformando le telecomunicazioni, promettendo velocità Internet più rapide e latenza inferiore, sconvolgendo i sistemi satellitari tradizionali e i fornitori di servizi Internet terrestri. Questo approccio innovativo migliora la connettività e apre nuove opportunità per i fornitori di telecomunicazioni e contenuti e le piattaforme di e-commerce per espandere la loro portata e i loro servizi a livello globale. La rete mesh di Starlink facilita una comunicazione senza soluzione di continuità tra i satelliti e le stazioni a terra, assicurando l'accesso a Internet ad alta velocità anche in aree remote come la foresta. Starlink supporta la connettività per il personale di Carnival Cruise Line e migliora l'esperienza degli ospiti sulle crociere. Brightline, una compagnia di trasporti, attribuisce a Starlink la rivoluzione della connettività sui treni, mentre i distretti scolastici cileni hanno

sperimentato un significativo miglioramento della connettività, potenziando insegnanti e studenti con un Internet ad alta velocità robusto ed efficiente.

- Telemedicina: la convergenza tra tecnologia spaziale e sanità ha portato a significative innovazioni nella telemedicina, sfruttando sistemi di telepresenza robotica per consultazioni e interventi chirurgici remoti. Questi sistemi, ispirati dai requisiti delle missioni spaziali, consentono ai fornitori di assistenza sanitaria di offrire cure a pazienti in aree remote o svantaggiate, superando le barriere geografiche. L'integrazione delle tecnologie derivate dallo spazio nella sanità ha il potenziale di rivoluzionare l'assistenza ai pazienti, affrontare le disparità sanitarie e ottimizzare i risultati clinici. Aziende come Intuitive Surgical hanno giocato un ruolo fondamentale nell'avanzamento dei sistemi chirurgici robotici, come dimostrato dal sistema chirurgico da Vinci. Questa tecnologia ha migliorato significativamente gli interventi chirurgici minimamente invasivi, aumentando la precisione e il controllo.
- Robotica: le piattaforme robotiche di Intuitive utilizzano tecnologie di imaging e visualizzazione di alta precisione, inclusa la visione 3D ad alta definizione e capacità di ingrandimento, contribuendo a migliorare la precisione chirurgica e i risultati per i pazienti. Robot specializzati vengono progettati e sviluppati per l'esplorazione spaziale, la manutenzione dei satelliti e le operazioni in ambienti spaziali difficili. Questi robot gestiscono assemblaggi, manutenzioni, riparazioni e missioni esplorative, operando da remoto dalla Terra o autonomamente, giocando un ruolo cruciale nel progresso dell'esplorazione spaziale. La Honeybee Robotics guida la fusione della robotica spaziale con applicazioni terrestri, rivoluzionando industrie come l'estrazione mineraria, l'energia, l'ispezione delle infrastrutture e l'agricoltura. Sfruttando le tecnologie derivate dallo spazio, Honeybee sviluppa sistemi autonomi che migliorano l'efficienza e la sicurezza in vari settori. In agricoltura, sistemi robotici ottimizzano compiti come il campionamento del suolo, il monitoraggio delle colture e la raccolta, migliorando le pratiche e aumentando le rese. Pacific Gas and Electric Company (PG&E) utilizza le piattaforme robotiche di Honeybee Robotics per ispezionare e mantenere infrastrutture critiche, inclusi gasdotti e linee di trasmissione elettrica (Guedes, 2024).
- Vita nello spazio: durante la pianificazione delle missioni, gli strumenti tecnologici assistono nell'ottimizzazione delle traiettorie, l'allocazione delle risorse e la gestione dei rischi, garantendo un utilizzo efficiente delle risorse e il raggiungimento degli obiettivi di missione in un ambiente spaziale ostile. La tecnologia consente il monitoraggio e il controllo in tempo reale dei sistemi spaziali, nonché la comunicazione tra i centri di controllo a terra e gli astronauti a bordo delle astronavi. Guardando ancora più avanti, esiste un enorme potenziale per le tecnologie ICT di supportare attività extraterrestri, come l'estrazione mineraria su Marte o sulla Luna, dove robotica avanzata, AI e analisi dei dati saranno essenziali per l'estrazione delle risorse e la colonizzazione. Questo ramo dell'economia spaziale sarà ispezionato in maniera più approfondita nel prossimo capitolo di questo elaborato.

In conclusione, il telerilevamento e la gestione dei dati spaziali giocano un ruolo fondamentale nella space economy per vari motivi, come visto. La convergenza della tecnologia spaziale con altri settori evidenzia la necessità di un ecosistema tecnologico robusto e interconnesso. Questa fusione aumenta la domanda di tecnologie ICT chiave, tra cui analisi dei dati, telecomunicazioni, cloud computing, AI e robotica.

3.5.2. Stakeholders

La gestione dei dati e il telerilevamento sono tecnologie fondamentali all'interno del panorama economico spaziale e pertanto incrociano una grande varietà di stakeholders, ognuno dei quali apporta contributi distinti e significativi. Di seguito un quadro riassuntivo di come ciascuno di questi gruppi influenzi lo sviluppo di queste tecnologie:

- Grandi imprese: le grandi imprese come Google (con Google Earth) e Amazon (con AWS Ground Station) investono in infrastrutture cloud avanzate, offrendo piattaforme che permettono l'archiviazione e l'elaborazione dei dati di remote sensing su larga scala. Airbus e Lockheed Martin sviluppano e lanciano satelliti con sensori all'avanguardia, migliorando la qualità e la risoluzione dei dati raccolti. Queste imprese utilizzano tecniche avanzate di intelligenza artificiale e machine learning per analizzare grandi quantità di dati satellitari, estrarre informazioni utili e identificare pattern significativi e forniscono, inoltre, piattaforme user-friendly che permettono agli utenti finali di accedere e analizzare i dati in modo efficiente. Ad esempio, Google Earth Engine offre strumenti per l'analisi geospaziale.
- PMI e startup: sviluppano soluzioni innovative e specializzate e collaborano con università e grandi aziende per sviluppare nuove tecnologie e metodi di analisi, accelerando l'innovazione.
- Agenzie spaziali: lanciano missioni scientifiche che raccolgono dati critici per lo studio del clima, l'ambiente e lo spazio. La NASA, ad esempio, con missioni come Landsat, fornisce dati utilizzati globalmente per il monitoraggio ambientale. Queste agenzie gestiscono centri di controllo missione che monitorano le operazioni dei satelliti, assicurando la raccolta continua di dati di alta qualità, e definiscono standard e linee guida per la raccolta e la gestione dei dati, garantendo la compatibilità e l'integrazione dei dati da diverse fonti.
- Corpi internazionali e nazionali: sviluppano regolamentazioni che governano l'uso dello spazio e la gestione dei dati, assicurando che le attività di remote sensing siano svolte in modo sicuro e responsabile. Questi enti offrono finanziamenti e sovvenzioni per progetti di remote sensing e data handling, incentivando la ricerca e lo sviluppo tecnologico e promuovono, più di tutti, la cooperazione internazionale, facilitando la condivisione dei dati e delle risorse.
- Altre organizzazioni (es. UNOOSA): facilitano piattaforme di collaborazione tra paesi e organizzazioni per la condivisione di dati e tecnologie. UNOOSA, ad esempio, promuove l'uso pacifico dello spazio e la cooperazione internazionale in progetti di telerilevamento. Queste organizzazioni offrono programmi di formazione e risorse educative per migliorare le capacità tecniche dei paesi in via di sviluppo nel campo del remote sensing e del data handling, e promuovono progetti che utilizzano dati di remote sensing per affrontare problemi globali come il cambiamento climatico, la gestione delle risorse naturali e la riduzione dei rischi di disastri naturali.

Ogni categoria di stakeholder contribuisce in modo unico e complementare alle attività di remote sensing e data handling. Le grandi imprese forniscono risorse e infrastrutture avanzate, le PMI e le startup guidano l'innovazione con soluzioni flessibili e specializzate, le agenzie spaziali offrono supporto infrastrutturale e definiscono standard, i corpi nazionali e internazionali sviluppano politiche e promuovono la cooperazione, mentre organizzazioni come UNOOSA facilitano la collaborazione globale e il supporto ai paesi in via di sviluppo. Questa sinergia di contributi è essenziale per il progresso continuo e sostenibile del settore.

3.5.3. Analisi

L'analisi dei delle risposte e i giudizi raccolti tramite il questionario ha fornito una panoramica circa le percezioni attuali e le aspettative future riguardo allo sviluppo di tecnologie spaziali sostenibili. Il telerilevamento e la gestione dei dati sono settori in rapida espansione nella space economy, tuttavia, devono affrontare numerose sfide per svilupparsi in modo sostenibile. Di seguito le problematiche che sono state evidenziate dai partecipanti al questionario che riguardano principalmente la congestione delle orbite, le lacune tecnologiche, i costi elevati, la regolamentazione, e la necessità di infrastrutture adeguate e sostenibili:

- Congestione delle orbite basse: le orbite basse terrestri (LEO) sono preferite per molte applicazioni di telerilevamento a causa della loro vicinanza alla Terra, che consente una maggiore risoluzione e tempi di risposta più rapidi. Tuttavia, l'affollamento crescente di oggetti in LEO presenta diverse problematiche: la densità crescente di satelliti in LEO aumenta il rischio di collisioni, compromettendo la sicurezza delle operazioni spaziali, mentre la presenza di detriti spaziali, composti principalmente da alluminio e altri metalli, contribuisce all'inquinamento atmosferico con conseguenze potenziali sul riscaldamento globale. Il trasporto di satelliti in orbite più alte, come le orbite geostazionarie (GTO), può ridurre la congestione, ma i costi di lancio sono ancora proibitivi per molte missioni commerciali e governative.
- Regolamentazione e accesso ai dati: con l'aumento del numero di satelliti di telerilevamento, si spera che la regolamentazione si allenti, facilitando l'accesso ai dati di telerilevamento. Attualmente, enti governativi come NOAA e Canadian Global Affairs Canada giocano un ruolo significativo nella regolamentazione e gestione dei dati, ma un minore coinvolgimento governativo potrebbe incentivare l'adozione di queste tecnologie da parte di una gamma più ampia di stakeholder. Questo accesso facilitato ai dati è cruciale per il monitoraggio dei cambiamenti climatici e l'implementazione di misure correttive.
- Infrastrutture sostenibili: costruire e mantenere le infrastrutture necessarie per supportare le attività di telerilevamento e gestione dei dati richiede una pianificazione e investimenti a lungo termine. Questo include reti di satelliti, stazioni terrestri, data center e risorse di calcolo. Lo sviluppo di soluzioni infrastrutturali sostenibili, come strutture alimentate da energie rinnovabili e sistemi efficienti di archiviazione e elaborazione dei dati, è essenziale per minimizzare l'impatto ambientale e garantire la resilienza delle infrastrutture dati alle sfide future.
- Incentivi finanziari e nuove tecnologie: incentivi finanziari per operare attività spaziali in modo sostenibile possono stimolare l'adozione di pratiche più responsabili. Tecnologie avanzate e nuove soluzioni satellitari possono alleviare il problema del sovraffollamento in LEO. Ad esempio, la sostituzione di grandi costellazioni di satelliti con una rete più piccola di tecnologie di telerilevamento avanzate potrebbe ridurre significativamente i detriti spaziali.
- Innovazioni nei sensori e nei modelli di radiazione: l'ottenimento e la fornitura di dati sufficienti in diverse parti dello spettro elettromagnetico richiedono soluzioni tecnologiche innovative per strumenti ottici con una maggiore risoluzione spaziale e spettrale, così come per radar ad apertura sintetica (SAR) e LIDAR. Lo sviluppo di modelli di trasferimento radiativo affidabili consente una determinazione più precisa dei componenti ambientali, fondamentale per applicazioni pratiche di telerilevamento che forniscono informazioni utili per il processo decisionale in molte attività governative o private terrestri.
- Competenze e gestione dei dati: un'altra sfida significativa è la formazione di personale qualificato e competente nella gestione dei dati, specialmente con l'approccio basato sull'intelligenza artificiale. Inoltre, è necessario personale capace di gestire l'uso efficiente delle

informazioni ottenute nella società. La mancanza di tali competenze può ostacolare l'adozione e l'implementazione efficace delle tecnologie di telerilevamento e gestione dei dati.

Come evidenziato precedentemente all'interno di questo elaborato, la risoluzione di queste sfide richiede un approccio integrato che comprenda innovazioni tecnologiche, investimenti infrastrutturali sostenibili e lo sviluppo di competenze specializzate. Fondamentale, ancora una volta, si rivela la collaborazione tra settore pubblico, privato e accademico al fine realizzare il pieno potenziale delle nuove, garantendo allo stesso tempo uno sviluppo sostenibile.

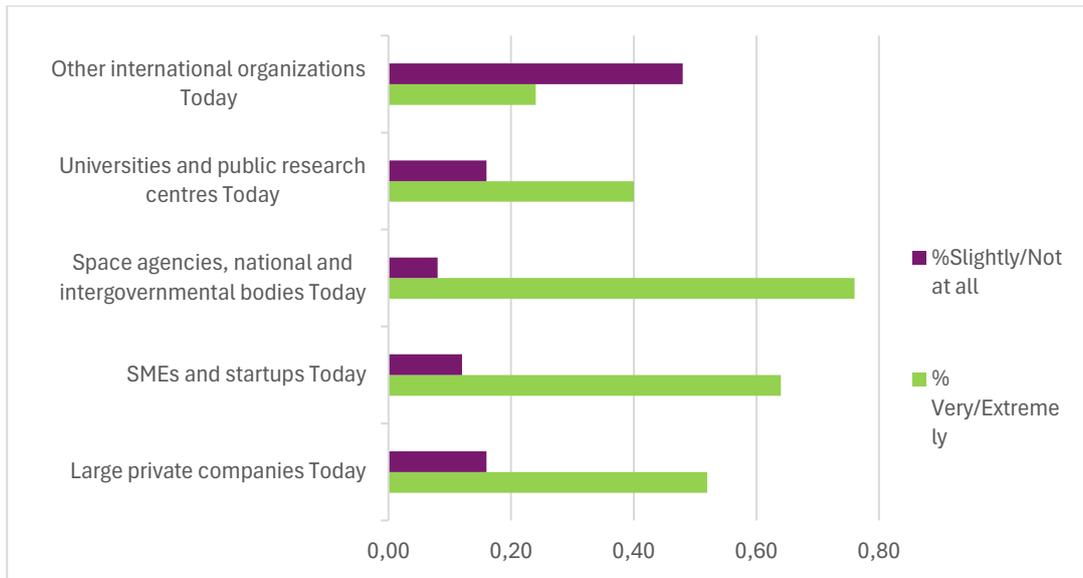


Figura 13: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi

L'analisi delle risposte al questionario ha evidenziato che le agenzie spaziali, gli enti nazionali e le startup sono gli stakeholder più influenti nello sviluppo e nell'implementazione delle tecnologie di remote sensing e data handling, mentre gli istituti accademici di ricerca e le organizzazioni internazionali, come l'UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs), risultano essere tra i meno influenti. Il ruolo delle grandi agenzie spaziali si è rivelato cruciale nello sviluppo di queste tecnologie di telerilevamento e nella gestione dei dati grazie alle massicce risorse finanziarie investite in ricerca e sviluppo. Attraverso il lancio di satelliti avanzati e la creazione di infrastrutture di supporto, queste aziende stabiliscono gli standard del settore e influenzano le direzioni future dello sviluppo tecnologico. Le startup, invece, stanno rivoluzionando il mercato con approcci innovativi e tecnologie all'avanguardia grazie alla loro natura agile e al focus sull'innovazione. Molte startup si concentrano sulla democratizzazione dell'accesso ai dati di telerilevamento, offrendo soluzioni economiche e scalabili che rendono questi dati accessibili a una vasta gamma di utenti. Questo aspetto aumenta la competitività e la dinamicità del settore, spingendo le grandi aziende a migliorare costantemente i loro prodotti e servizi.

Gli istituti accademici di ricerca, sebbene abbiano un ruolo fondamentale nello sviluppo delle conoscenze scientifiche e tecnologiche di base, sono percepiti come meno influenti rispetto alle aziende private e alle startup. Le ragioni di questa minore influenza possono includere budget minimi che possono limitare la portata e l'impatto dei progetti di ricerca, e i tempi allungati necessari per produrre risultati applicabili rispetto ai rapidi cicli di sviluppo delle aziende private. Le istituzioni accademiche, infine, tendono a concentrarsi più sulla scoperta scientifica che sull'applicazione

commerciale immediata delle loro ricerche. Le organizzazioni internazionali come l'UNOOSA e le agenzie spaziali nazionali, pur avendo un ruolo chiave nella regolamentazione e nella cooperazione internazionale, risultano meno influenti in termini di sviluppo tecnologico diretto. Queste organizzazioni sono principalmente orientate alla regolamentazione, alla gestione dei trattati internazionali e alla promozione della collaborazione piuttosto che allo sviluppo tecnologico diretto. L'accento posto su politiche e normative, sebbene cruciale per un uso sostenibile e sicuro dello spazio, può limitare l'influenza diretta sullo sviluppo delle tecnologie di telerilevamento e data handling .

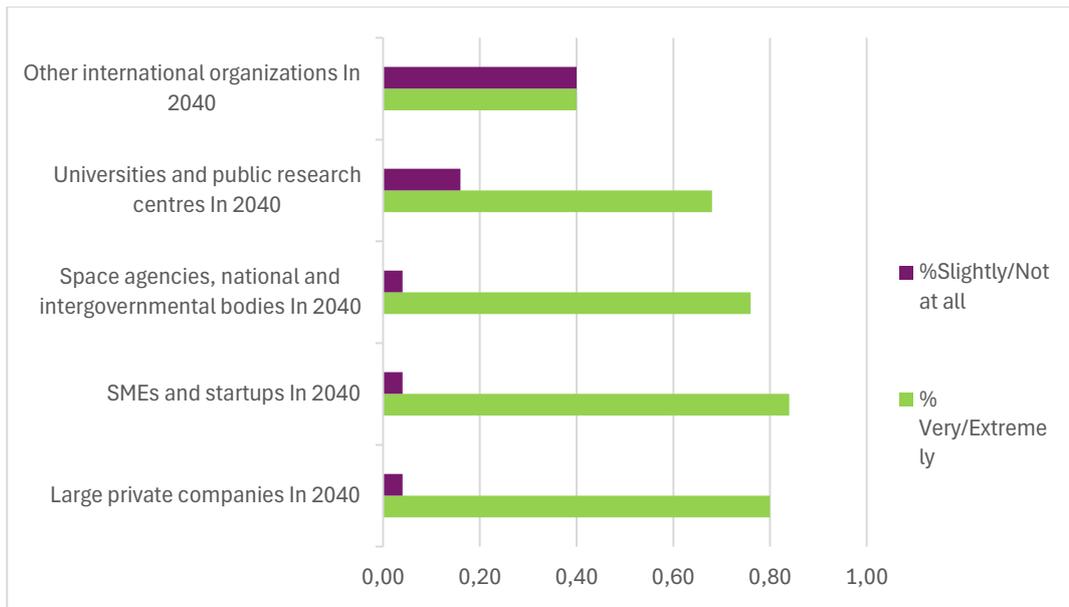


Figura 14: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040

Entro il 2040, si prevede un maggiore equilibrio nell'influenza degli stakeholder nel settore del remote sensing e del data handling. Questo sviluppo sarà guidato in primis da una riduzione, attesa, dei costi di lancio. Piccoli satelliti, come i CubeSat, permetteranno a istituti di ricerca e imprese private di partecipare attivamente con costi ridotti. Inoltre, come evidenziato in uno dei capitoli precedenti di questo elaborato, ci si aspetta l'introduzione di politiche nuove e incentivi che facilitino l'ingresso di nuove imprese nel settore spaziale. Questi fattori contribuiranno a un equilibrio maggiore tra gli stakeholder, rendendo le tecnologie di remote sensing e data handling più accessibili e integrate nelle attività quotidiane.

3.6. Life support system and ISRU

3.6.1. Introduzione

La sesta sezione del questionario si concentra sulle nuove tecnologie di Life Support System (LSS) e data In-Situ Resource Utilization (ISRU) e in particolare sulle sue opportunità e le sue criticità più rilevanti. Il capitolo intende rilevare le opinioni degli esperti del settore circa i vantaggi e gli svantaggi più significativi che caratterizzano lo sviluppo sostenibile di queste tecnologie entro il 2040. Parallelamente, il capitolo si focalizzerà sull'importanza e l'influenza degli stakeholders principali nel supporto e nell'implementazione delle nuove tecnologie. Attraverso questa analisi, si vuole dare una visione complessiva e dettagliata delle dinamiche che regolano il settore e delle possibili soluzioni per un futuro spaziale più sostenibile.

Le tecnologie di Life Support System sono sistemi progettati per garantire la sopravvivenza degli esseri umani nello spazio, fornendo aria respirabile, acqua potabile, alimenti, e la gestione dei rifiuti. Questi sistemi devono funzionare in ambienti estremamente ostili e isolati, come la Stazione Spaziale Internazionale (ISS) o le future basi lunari e marziane e pertanto incrociano una serie di attività fondamentali: producono ossigeno attraverso l'elettrolisi dell'acqua o la rigenerazione chimica, purificano l'acqua dai rifiuti umani, dall'umidità e da altre fonti per renderla nuovamente potabile, trattano i rifiuti solidi e liquidi per minimizzare la contaminazione e riutilizzare i nutrienti, coltivano piante e alghe in sistemi chiusi che utilizzano i nutrienti riciclati e mantengono la composizione dell'aria all'interno di parametri sicuri, rimuovendo CO₂ e altri contaminanti. Sono progettati per essere autosufficienti e minimizzano la necessità di rifornimenti esterni.

Le tecnologie In-Situ Resource Utilization permettono l'utilizzo delle risorse disponibili localmente su corpi celesti come la Luna e Marte per supportare missioni spaziali. Queste tecnologie riducono la dipendenza dai rifornimenti terrestri, migliorando la sostenibilità delle missioni a lungo termine. Sono tecnologie per l'estrazione di acqua, metalli, e altri materiali dal suolo o dal ghiaccio. Utilizzano risorse locali per generare energia e producono ossigeno e idrogeno dall'acqua per utilizzarli come propellente per i razzi. Inoltre, si avvalgono di sistemi di stampa 3D per creare strumenti, parti e strutture utilizzando materiali locali.

3.6.2. Stakeholders

Le tecnologie di Life Support System e In-Situ Resource Utilization sono tra i trend emergenti dell'economia spaziale e pertanto richiamano l'attenzione di una grande varietà di stakeholders, ognuno dei quali si impegna a contribuire in maniera distinta e significativa. Di seguito un riassunto degli influssi di ciascuno di questi gruppi sullo sviluppo di queste tecnologie:

- Grandi imprese private e startup: le grandi imprese come SpaceX, Blue Origin, e le startup del settore spaziale guidano l'innovazione e investono significativamente nello sviluppo delle tecnologie LSS e ISRU. Queste aziende spesso collaborano con enti governativi e accademici per portare avanti progetti avanzati e implementare nuove tecnologie. La competizione e la ricerca di efficienza economica da parte delle imprese private hanno accelerato lo sviluppo di tecnologie più economiche e scalabili (Panoramica dell'iniziativa "Accesso allo spazio per tutti", s.d.).
- Istituti accademici e di ricerca: gli istituti accademici e di ricerca contribuiscono in modo significativo alla base teorica e pratica delle tecnologie LSS e ISRU. Le università e i centri di

ricerca sviluppano prototipi e conducono esperimenti cruciali per testare nuove tecnologie. Il MIT, ad esempio, ha sviluppato il concetto del "Cubo di Vitanova", un sistema bioregenerativo per il supporto vitale basato su alghe che potrebbe fornire ossigeno e nutrizione agli astronauti su lunghe missioni.

- Agenzie spaziali governative (NASA, ESA, etc.): le agenzie spaziali governative forniscono gran parte dei finanziamenti per la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie LSS e ISRU. Stabiliscono anche le normative e le linee guida che regolano le missioni spaziali e facilitano le collaborazioni tra diversi paesi e organizzazioni, promuovendo lo scambio di conoscenze e risorse (Panoramica dell'iniziativa "Accesso allo spazio per tutti", s.d.).
- Organizzazioni internazionali: le organizzazioni internazionali lavorano per sviluppare politiche e standard globali per l'utilizzo sostenibile delle risorse spaziali, promuovono la consapevolezza dell'importanza della sostenibilità nello spazio e facilitano l'educazione del pubblico e dei decision-makers. Il lavoro di organizzazioni di questo tipo, nel complesso, facilita l'accesso alle tecnologie ISRU e LSS per tutti i paesi.

Come già evidenziato all'interno di questo elaborato, il raggiungimento della sostenibilità a lungo termine nello spazio richiede la collaborazione e il contributo di una vasta gamma di stakeholder. Le grandi imprese private e le startup sono i principali motori dell'innovazione, mentre gli istituti accademici forniscono la base di ricerca e formano nuovi esperti. Le agenzie governative finanziano e regolano le attività spaziali, e le organizzazioni internazionali stabiliscono politiche e standard globali. Insieme, questi stakeholder lavorano per sviluppare tecnologie avanzate di LSS e ISRU che possano supportare l'esplorazione e la colonizzazione dello spazio in modo sostenibile (Panoramica dell'iniziativa "Accesso allo spazio per tutti", s.d.).

3.6.3. Analisi

L'analisi delle risposte raccolte tramite il questionario ha fornito una panoramica delle percezioni attuali e le aspettative future riguardo allo sviluppo di tecnologie di Life Support System e In-Situ Resource Utilization sostenibili. Gli spunti emersi dai partecipanti al questionario evidenziano una serie di tematiche cruciali per il futuro delle missioni spaziali, in particolare in relazione alla sostenibilità e all'efficienza delle operazioni nello spazio. In primo luogo, le tecnologie In-Situ Resource Utilization (ISRU) emergono come componenti essenziali per l'estrazione e l'utilizzo delle risorse locali sui corpi celesti come la Luna o Marte. Queste tecnologie permettono l'estrazione di ossigeno e idrogeno dalla regolite lunare, oltre alla produzione di parti meccaniche e celle solari. L'implementazione di tecnologie ISRU riduce significativamente la dipendenza dalle risorse terrestri, migliorando la sostenibilità delle missioni spaziali e aprendo nuove possibilità per la permanenza a lungo termine nello spazio. Parallelamente, la ricerca e l'implementazione di sistemi di supporto alla vita bioregenerativi, che sfruttano processi biologici per riciclare e rigenerare risorse, sono cruciali per garantire la sostenibilità a lungo termine delle missioni spaziali. Questi sistemi permettono il riciclo dei rifiuti e la produzione di risorse vitali, come l'acqua e l'ossigeno, riducendo così la necessità di rifornimenti dalla Terra. L'integrazione di tali tecnologie è fondamentale per supportare gli insediamenti umani su altri corpi celesti, rendendo possibile una presenza umana sostenibile nello spazio. Lo sviluppo di sistemi energetici avanzati rappresenta un altro aspetto fondamentale per migliorare l'efficienza energetica delle missioni spaziali. L'energia solare, l'energia nucleare e altre fonti rinnovabili sono essenziali per sostenere missioni di lunga durata. Queste tecnologie devono essere robuste e in grado di operare autonomamente in ambienti spaziali estremi, garantendo il funzionamento continuo delle missioni senza la necessità di interventi terrestri. Inoltre, le tecnologie ISRU richiedono significativi sviluppi nelle

aree della produzione e dell'assemblaggio in loco, del servizio in orbita e delle operazioni di prossimità. Dimostrare queste tecnologie su larga scala a terra e prepararle per il lancio è critico per il loro successo futuro. Tuttavia, il clima economico globale attuale potrebbe influire negativamente sui finanziamenti per lo sviluppo delle tecnologie di supporto alla vita e ISRU, che dipendono in gran parte da sovvenzioni governative e programmi spaziali. Nonostante le numerose opportunità presenti nel campo del supporto alla vita e delle tecnologie ISRU, permangono dubbi sulla sostenibilità a lungo termine degli insediamenti sulla Luna o su Marte. I sottoprodotti dei sistemi di supporto alla vita e delle tecnologie ISRU potrebbero contaminare lo spazio, aumentando il rischio di collisioni e contribuendo alla presenza di metalli nell'atmosfera, con potenziali conseguenze sul riscaldamento terrestre. Per percorrere la strada della sostenibilità a lungo termine nello spazio, è necessario sviluppare sistemi di supporto alla vita rigenerativi e tecnologie ISRU in grado di sostenere l'abitazione e l'esplorazione umana in modo indefinito. Allo stesso tempo, i sistemi di supporto alla vita tradizionali, che si basano pesantemente su risorse fornite dalla Terra, presentano significative sfide logistiche e limitano la sostenibilità delle missioni a lungo termine. Pertanto, l'avanzamento di sistemi di supporto alla vita a circuito chiuso, capaci di riciclare e rigenerare risorse, è essenziale per superare queste limitazioni. Affrontare le sfide economiche e ambientali sarà fondamentale per realizzare una visione di esplorazione e colonizzazione spaziale sostenibile. La combinazione di avanzamenti tecnologici, cooperazione internazionale e consapevolezza pubblica sarà determinante per garantire che le missioni spaziali future siano non solo tecnicamente fattibili, ma anche sostenibili e rispettose dell'ambiente.

L'analisi delle risposte al questionario ha evidenziato che le agenzie spaziali, gli enti nazionali e gli istituti accademici e di ricerca sono gli stakeholder più influenti nello sviluppo e nell'implementazione di tecnologie di Life Support System e ISRU. In contro tendenza con quanto rilevato all'interno dei precedenti capitoli di questo elaborato, le grandi imprese private e poi anche le organizzazioni internazionali, come l'UNOOSA risultano essere tra i meno influenti. Il ruolo delle grandi agenzie spaziali si è rivelato cruciale nello sviluppo di queste tecnologie soprattutto grazie ai grandi investimenti in ricerca e sviluppo.

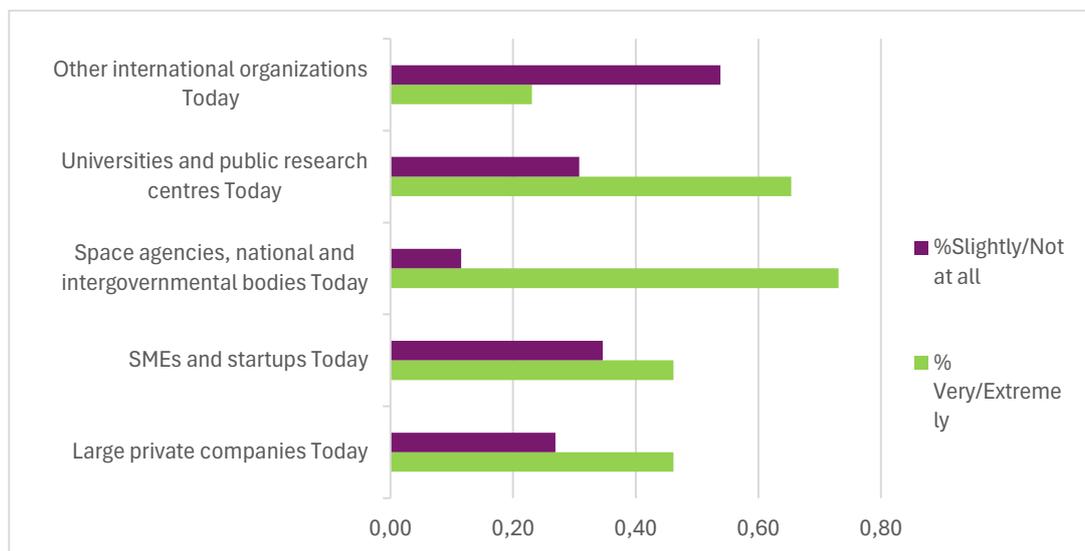


Figura 15: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi

Le agenzie spaziali sono i principali finanziatori delle missioni spaziali e della ricerca correlata. La NASA, ad esempio, ha un budget annuale di miliardi di dollari, destinato in parte allo sviluppo di tecnologie avanzate per il supporto vitale e l'ISRU. Questo finanziamento consente lo sviluppo di prototipi, test e

implementazione di nuove tecnologie. La NASA stessa, inoltre, collabora con SpaceX e altre aziende private per sviluppare nuove tecnologie ISRU e LSS, integrando innovazioni del settore privato con le capacità e l'esperienza delle agenzie governative. Le agenzie spaziali possiedono un know-how consolidato grazie a decenni di missioni spaziali. Questa esperienza permette di affrontare le sfide tecniche e operative con una prospettiva ben informata, garantendo la sicurezza e l'efficacia delle tecnologie sviluppate. L'ESA, ad esempio, ha utilizzato la sua esperienza nella gestione di missioni a lungo termine sulla Stazione Spaziale Internazionale per sviluppare il Sistema di Supporto Vitale e Controllo Ambientale (ECLSS), che ricicla acqua e aria per gli astronauti.

Gli enti nazionali e internazionali influenzano le politiche spaziali globali. Queste organizzazioni promuovono lo sviluppo sostenibile delle attività spaziali, incentivando la cooperazione internazionale e l'adozione di pratiche sostenibili. Il programma Horizon 2020 dell'Unione Europea, ad esempio, ha finanziato numerosi progetti di ricerca spaziale, inclusi quelli focalizzati sullo sviluppo di tecnologie di supporto vitale e ISRU. Le collaborazioni tra istituti accademici e altre organizzazioni permettono di affrontare le sfide tecnologiche da diverse prospettive, aumentando le possibilità di successo. L'International Space University (ISU), a questo proposito, offre programmi di formazione avanzata che preparano gli studenti a lavorare nelle missioni spaziali, focalizzandosi su tecnologie LSS e ISRU, mentre l'Università del Surrey ha collaborato con l'ESA per sviluppare nuove tecnologie di supporto vitale per missioni spaziali a lungo termine, combinando la ricerca accademica con le capacità operative dell'agenzia spaziale (L'industria dello spazio è l'opportunità del secolo: al via la più grande piattaforma al mondo per la formazione, 2022).

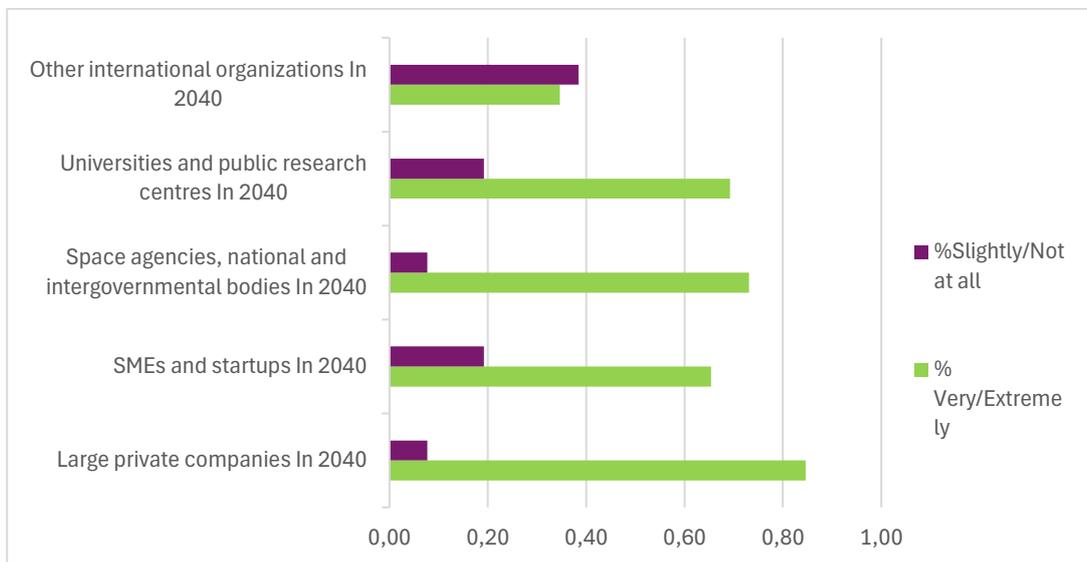


Figura 16: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040

Entro il 2040, ci si aspetta che le grandi imprese private acquisiscano un'influenza sempre maggiore. Aziende private, come SpaceX, Blue Origin, e altri giganti tecnologici, stanno investendo massicciamente in ricerca e sviluppo di tecnologie avanzate per l'esplorazione spaziale. SpaceX, ad esempio, ha investito miliardi di dollari nello sviluppo del sistema Starship, che mira a rendere i viaggi interplanetari più accessibili e sostenibili, includendo tecnologie avanzate di ISRU per la produzione di propellente su Marte. La stessa azienda, inoltre, collabora con la NASA per le missioni Artemis, con

SpaceX che fornisce il veicolo Starship per l'atterraggio lunare e la NASA che offre il supporto tecnico e operativo. Blue Origin sta sviluppando il lander lunare Blue Moon, che incorpora tecnologie di ISRU per l'utilizzo delle risorse lunari, dimostrando un approccio innovativo e flessibile alle missioni lunari. In generale, le aziende private cercano modelli di business sostenibili per le attività spaziali, mirando a rendere commercialmente viabile l'esplorazione e l'utilizzo delle risorse spaziali. Questo approccio stimola l'innovazione tecnologica e l'efficienza operativa. Astrobotic Technology, in questo senso, sta sviluppando tecnologie di ISRU per l'estrazione e l'utilizzo delle risorse lunari, con l'obiettivo di fornire servizi di trasporto e logistica sostenibili sulla Luna (NASA Sending Five Payloads to Moon on Astrobotic's Peregrine Lander, 2024).

Le implicazioni di questa crescente influenza includono un'accelerazione dello sviluppo tecnologico, una maggiore accessibilità e commercializzazione delle tecnologie spaziali, collaborazioni pubblico-private più solide, e un'enfasi sulla sostenibilità a lungo termine delle missioni spaziali. Questi fattori collettivi contribuiranno a plasmare il futuro dell'esplorazione e dell'utilizzo delle risorse spaziali, aprendo nuove frontiere per l'umanità.

3.7. Spacecraft

3.7.1. Introduzione

Il settore dello sviluppo delle tecnologie per i veicoli spaziali, comunemente noti come spacecraft, è caratterizzato da una serie di sfide e criticità che ne condizionano il progresso e l'efficienza. I veicoli spaziali, progettati per operare al di fuori dell'atmosfera terrestre, sono utilizzati per una vasta gamma di scopi, tra cui l'esplorazione dello spazio, le comunicazioni, l'osservazione della Terra e la ricerca scientifica. Questi veicoli possono essere con o senza equipaggio e includono satelliti, sonde, lander, rover e stazioni spaziali.

Una delle principali sfide che il settore deve affrontare è rappresentata dagli elevati costi associati allo sviluppo e al lancio dei veicoli spaziali. Questi costi ingenti richiedono investimenti significativi e la mancanza di fondi adeguati può rallentare notevolmente il progresso tecnologico, limitando la capacità di innovare e avanzare. La questione dei finanziamenti stabili e sufficienti è di primaria importanza, soprattutto per le missioni a lungo termine e per i progetti che richiedono tecnologie avanzate e costose. La mancanza di risorse finanziarie adeguate rappresenta una criticità che necessita di essere affrontata attraverso strategie di finanziamento innovative e un maggiore coinvolgimento di attori privati e pubblici. Un'altra sfida significativa riguarda l'impatto ambientale dei sistemi di propulsione tradizionali, i quali utilizzano carburanti che possono avere un impatto notevole sia sulla Terra che nello spazio. La necessità di sviluppare tecnologie di propulsione più sostenibili è cruciale per ridurre l'impatto ambientale delle missioni spaziali. La gestione dei detriti spaziali, ovvero i rifiuti generati dalle missioni, è una criticità che richiede soluzioni innovative per minimizzare l'accumulo di detriti nello spazio e garantire la sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali. Inoltre, l'aumento della complessità delle missioni spaziali esige lo sviluppo di sistemi sempre più autonomi e intelligenti. Le missioni moderne richiedono infatti che i veicoli spaziali siano in grado di operare autonomamente per lunghi periodi senza intervento umano diretto. Questo rappresenta una sfida significativa in termini di ricerca e sviluppo di intelligenza artificiale e sistemi autonomi affidabili. Parallelamente, le missioni di esplorazione spaziale a lungo termine necessitano di schermature migliorate contro le radiazioni cosmiche per garantire la sicurezza degli equipaggi. La protezione dalle radiazioni è una criticità fondamentale, in quanto le radiazioni cosmiche rappresentano un rischio significativo per la salute degli astronauti. La riutilizzabilità dei componenti dei veicoli spaziali è un'altra area critica che necessita di attenzione. Per ridurre i costi di lancio e aumentare la sostenibilità delle missioni spaziali, è essenziale sviluppare componenti riutilizzabili. La riutilizzabilità dei primi stadi dei razzi, dei veicoli di rientro e dei veicoli operanti nello spazio può ridurre significativamente i costi di accesso allo spazio, promuovendo un'esplorazione spaziale più sostenibile. In questo contesto, l'uso di materiali avanzati come compositi, leghe e ceramiche nel design dei veicoli spaziali può migliorare le prestazioni complessive, ridurre il peso e aumentare la durabilità dei componenti, consentendo una maggiore efficienza e riutilizzabilità. L'implementazione di propellenti sostenibili e sistemi di propulsione rinnovabili, riutilizzabili ed economici è di primaria importanza per il futuro delle missioni spaziali. La necessità di sviluppare propulsioni più ecologiche, combustibili più puliti e alternative ai materiali tossici è una sfida che richiede innovazione e ricerca continua. Inoltre, l'utilizzo di materiali innovativi per l'immagazzinamento di energia e la protezione dalle radiazioni cosmiche può contribuire significativamente a ridurre la quantità di detriti spaziali generati da ogni missione, migliorando la sostenibilità complessiva delle attività spaziali. Un altro aspetto cruciale è la necessità di una forte collaborazione internazionale. La cooperazione tra diverse agenzie spaziali, aziende private e governi è essenziale per ottenere risultati significativi in tempi brevi. Attualmente, esistono pochi incentivi per le aziende e i governi a rendere i veicoli spaziali sostenibili, e il raggiungimento del livello di maturità tecnologica (Technology Readiness Level, TRL) 9 per nuovi componenti progettati per la sostenibilità è un obiettivo costoso e impegnativo.

È necessario adottare standard internazionali più rigorosi per limitare l'uso di componenti non sostenibili e promuovere strategie di fine vita che diventino requisiti obbligatori. L'adozione di etichette di sostenibilità rappresenta un passo positivo verso una maggiore trasparenza e responsabilità ambientale nel settore spaziale. Alcune apparecchiature tecnologiche dovrebbero diventare standard obbligatori, come le travi, le interfacce di comunicazione a terra e inter-satellite, e i dock per la rimozione attiva dei detriti spaziali. L'intera industria dei servizi in orbita e una nuova generazione di veicoli spaziali a supporto di questi servizi devono ancora essere sviluppate, richiedendo incentivi e supporto da parte dei governi e delle agenzie spaziali. Infine, l'implementazione dell'ecodesign nel processo di sviluppo è un elemento fondamentale per promuovere la sostenibilità nel settore spaziale. L'ecodesign implica l'integrazione di principi di sostenibilità fin dalle prime fasi di progettazione dei veicoli spaziali, garantendo che le tecnologie future possano contribuire a un'esplorazione dello spazio più responsabile e rispettosa dell'ambiente. Attraverso un approccio coordinato e collaborativo, è possibile affrontare le sfide e le criticità del settore, promuovendo un progresso tecnologico che sia al contempo sostenibile ed efficiente (Starek, 2015).

3.7.2. Stakeholders

Il settore dei veicoli spaziali è caratterizzato da una complessa rete di attori che comprendono grandi imprese, piccole e medie imprese (PMI), startup, agenzie spaziali, corpi internazionali e nazionali, e altre organizzazioni come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-atmosferico (UNOOSA). Ciascuno di questi stakeholder svolge un ruolo cruciale nell'avanzamento tecnologico e nell'espansione delle capacità operative nel campo dell'esplorazione spaziale.

Le grandi imprese, con le loro risorse finanziarie significative e competenze avanzate, rappresentano i principali motori dell'innovazione nel settore spaziale. Aziende come SpaceX, Boeing, Lockheed Martin e Northrop Grumman hanno sviluppato tecnologie all'avanguardia che hanno rivoluzionato l'industria, rendendo possibile il riutilizzo dei veicoli di lancio e riducendo i costi complessivi delle missioni spaziali. Queste imprese sono in grado di condurre ricerche su larga scala, sperimentare nuove tecnologie e sviluppare infrastrutture spaziali complesse, come le stazioni spaziali e le piattaforme di lancio interplanetarie. La loro capacità di attrarre investimenti e di collaborare con enti governativi e altre imprese le rende fondamentali per il progresso del settore. Le piccole e medie imprese (PMI) e le startup giocano un ruolo altrettanto essenziale, sebbene con approcci e risorse diverse. Le PMI e le startup spesso introducono innovazioni dirompenti grazie alla loro flessibilità e capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti del mercato. Queste entità sono spesso specializzate in nicchie tecnologiche specifiche, come lo sviluppo di componenti miniaturizzati, tecnologie di propulsione avanzate, o soluzioni software per la gestione dei dati satellitari. La loro agilità consente di esplorare e implementare nuove idee con maggiore rapidità rispetto alle grandi imprese. Tuttavia, queste aziende devono affrontare sfide significative in termini di accesso ai finanziamenti e di scalabilità delle loro operazioni. Nonostante ciò, le PMI e le startup contribuiscono in modo sostanziale all'ecosistema dell'innovazione spaziale, spesso collaborando con grandi imprese e istituzioni governative per portare avanti progetti pionieristici. Le agenzie spaziali nazionali e internazionali, come la NASA, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), e l'Agenzia Spaziale Russa (Roscosmos), sono tra i principali promotori delle missioni di esplorazione spaziale. Questi enti svolgono un ruolo cruciale nella definizione delle politiche spaziali, nella gestione dei programmi di ricerca e nello sviluppo delle infrastrutture necessarie per le operazioni spaziali. Le agenzie spaziali non solo finanziano e conducono missioni di esplorazione, ma stabiliscono anche standard e linee guida per l'intera industria. La collaborazione tra agenzie spaziali di diverse nazioni facilita la condivisione delle conoscenze e delle risorse, promuovendo un progresso

scientifico e tecnologico globale. Inoltre, queste agenzie fungono da intermediari tra i vari stakeholder del settore, facilitando partenariati pubblici-privati e sostenendo le PMI e le startup attraverso programmi di sovvenzioni e contratti di appalto. I corpi internazionali, come le Nazioni Unite, attraverso organizzazioni come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-atmosferico (UNOOSA), svolgono un ruolo di coordinamento e regolamentazione a livello globale. UNOOSA, ad esempio, promuove l'uso pacifico dello spazio, facilita la cooperazione internazionale e assiste i paesi in via di sviluppo nel costruire le loro capacità spaziali. Queste organizzazioni stabiliscono normative internazionali che mirano a garantire la sicurezza e la sostenibilità delle attività spaziali, affrontando questioni critiche come la gestione dei detriti spaziali e l'uso responsabile delle risorse spaziali. La loro funzione è cruciale per mantenere un quadro giuridico e operativo armonizzato a livello globale, assicurando che le attività spaziali siano condotte in modo equo e sostenibile. Inoltre, altre organizzazioni internazionali e nazionali, inclusi consorzi di ricerca, istituti accademici e organizzazioni non governative, contribuiscono alla ricerca e alla diffusione delle conoscenze nel campo spaziale. Questi enti supportano lo sviluppo di tecnologie innovative, promuovono l'educazione e la formazione nel settore spaziale e sensibilizzano il pubblico sull'importanza delle attività spaziali. La loro collaborazione con le imprese, le agenzie spaziali e gli organismi internazionali è fondamentale per creare un ecosistema spaziale integrato e dinamico.

In definitiva, lo sviluppo delle tecnologie per i veicoli spaziali è il risultato di un complesso intreccio di contributi provenienti da una varietà di stakeholder. Le grandi imprese apportano risorse e competenze su larga scala, le PMI e le startup introducono innovazioni rapide e flessibili, le agenzie spaziali guidano la ricerca e stabiliscono le politiche, mentre i corpi internazionali e le altre organizzazioni garantiscono un quadro regolamentare armonizzato e promuovono la cooperazione globale. Questa interazione sinergica è essenziale per affrontare le sfide e le criticità del settore, favorendo un progresso tecnologico sostenibile e inclusivo.

3.7.3. Analisi

L'analisi delle risposte raccolte tramite il questionario ha fornito una panoramica delle percezioni attuali e delle aspettative future riguardanti lo sviluppo sostenibile delle tecnologie legate allo Spacecraft. Come già evidenziato nei capitoli precedenti, emerge chiaramente la necessità di disporre di fondi adeguati per affrontare efficacemente le sfide dello sviluppo sostenibile dei veicoli spaziali, condurre attività di ricerca approfondita e consentire la condivisione e l'interoperabilità di sistemi e protocolli. I sistemi di propulsione tradizionali, infatti, spesso caratterizzati da un elevato impiego di risorse e da un impatto ambientale significativo e richiedono un ripensamento sostanziale.

In questo senso, l'evoluzione verso sistemi sempre più autonomi e intelligenti è una necessità impellente, dato anche l'aumento della complessità delle missioni spaziali. Parallelamente, le missioni di esplorazione a lungo termine necessitano di schermature migliorate contro le radiazioni, al fine di garantire la sicurezza degli equipaggi. In questo contesto, gli attori privati devono imparare a sfruttare in modo più efficace i fondi pubblici che riescono a ottenere per realizzare le loro ambizioni. Aumentare la riutilizzabilità dei componenti dei veicoli spaziali, come i veicoli di lancio e le capsule per equipaggi, può essere fondamentale per ridurre i costi di lancio e minimizzare l'impatto ambientale. Lo sviluppo di tecnologie riutilizzabili, infatti, inclusi i primi stadi riutilizzabili, i veicoli di rientro e quelli operanti nello spazio, ridurrebbe significativamente i costi di accesso allo spazio, promuovendo un'esplorazione più sostenibile. In questo senso, l'impiego di materiali avanzati come compositi, leghe e ceramiche nel design dei veicoli spaziali può migliorare le prestazioni complessive, ridurre il peso e aumentare la

durabilità. Allo stesso modo, l'uso e la generazione di propellenti sostenibili, insieme a sistemi di propulsione rinnovabili, riutilizzabili ed economici, sono di primaria importanza al fine di ottenere combustibili più puliti e alternative ai materiali tossici. Inoltre, l'utilizzo di materiali innovativi per l'immagazzinamento di energia e la protezione dalle radiazioni cosmiche può contribuire significativamente a ridurre la quantità di detriti spaziali generati da ogni missione. È quindi fondamentale orientare lo sviluppo tecnologico verso l'aumento della riutilizzabilità dei componenti e della durata operativa, la riduzione dei costi delle operazioni di lancio e l'aumento dell'accessibilità allo spazio.

Per sostenere efficacemente le attività di ricerca e sviluppo, è indispensabile una forte collaborazione internazionale, cruciale per ottenere risultati significativi in tempi brevi. Attualmente, esistono pochi incentivi per le aziende e i governi a rendere i veicoli spaziali sostenibili, e raggiungere il livello di maturità tecnologica (TRL) 9 per nuovi componenti progettati per la sostenibilità è un obiettivo costoso e impegnativo. È necessario che vengano adottati standard internazionali più rigorosi da parte di tutti i lanciatori per limitare l'uso di componenti non sostenibili. Le strategie di fine vita devono diventare un requisito obbligatorio, e l'adozione di etichette di sostenibilità rappresenta un passo positivo verso questo obiettivo. Alcune apparecchiature tecnologiche dovrebbero diventare standard obbligatori, come le travi, le interfacce di comunicazione a terra e inter-satellite, e i dock per la rimozione attiva. L'intera industria dei servizi in orbita e una nuova generazione di veicoli spaziali a supporto di questi servizi devono ancora essere sviluppate. Gli incentivi attuali da parte dei governi e delle agenzie spaziali sono pertanto benvenuti e rappresentano un supporto indispensabile.

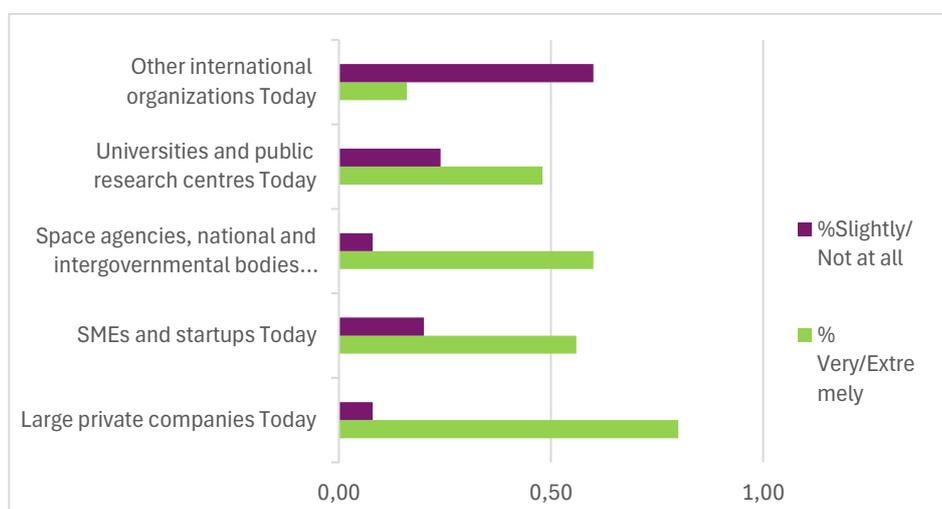


Figura 17: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi

L'analisi statistica delle risposte al questionario ha rivelato che i principali stakeholder nel campo dello sviluppo delle tecnologie per i veicoli spaziali sono le grandi aziende private. Questo risultato non sorprende, data la capacità di queste imprese di effettuare investimenti significativi in ricerca e sviluppo (R&D), e di affrontare progetti complessi su larga scala con risorse finanziarie e tecnologiche avanzate. Grandi aziende come SpaceX, Boeing e Lockheed Martin, grazie alle loro considerevoli capacità finanziarie e operative, possono portare avanti progetti ambiziosi che richiedono ingenti investimenti iniziali e lunghi tempi di sviluppo. Queste imprese sono in grado di sviluppare tecnologie innovative e di guidare il progresso tecnologico del settore, beneficiando anche delle economie di scala che riducono

i costi di produzione e rendono le tecnologie spaziali più accessibili. Inoltre, la loro partecipazione a collaborazioni internazionali consente di condividere risorse e competenze, potenziando ulteriormente l'innovazione e l'efficacia delle missioni spaziali.

Altri stakeholder, tra cui le piccole e medie imprese (PMI), le startup, le agenzie spaziali nazionali e le organizzazioni internazionali sono anch'essi cruciali, ma risultano meno predominanti rispetto alle grandi aziende private. Le PMI e le startup apportano un contributo fondamentale in termini di innovazione e flessibilità. Queste aziende sono spesso più agili e in grado di adottare rapidamente nuove tecnologie: le startup, in particolare, hanno dimostrato di poter rivoluzionare il settore con idee innovative e modelli di business che possono essere integrate nei sistemi più grandi. Tuttavia, la loro capacità di influenzare il settore su larga scala è limitata rispetto a quella delle grandi aziende, principalmente a causa delle minori risorse finanziarie e operative a disposizione. Le agenzie spaziali nazionali e internazionali, come la NASA, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e Roscosmos, giocano un ruolo fondamentale nella regolamentazione, finanziamento e promozione delle attività spaziali. Queste agenzie forniscono finanziamenti essenziali per le missioni di esplorazione spaziale e partecipano attivamente alla pianificazione e implementazione dei progetti. Inoltre, stabiliscono le normative che garantiscono la sicurezza e la sostenibilità delle missioni spaziali e promuovono la cooperazione internazionale. Nonostante l'importanza del loro ruolo, la loro influenza è spesso mediata dalla necessità di collaborare con altre entità e dalla dipendenza dai finanziamenti pubblici, che possono essere soggetti a fluttuazioni politiche ed economiche.

Infine, il contributo delle organizzazioni internazionali come l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-atmosferico (UNOOSA) è percepito in maniera leggermente inferiore rispetto a quello degli altri stakeholder. Sebbene queste organizzazioni svolgano un ruolo cruciale nel facilitare la cooperazione globale e nel promuovere l'uso pacifico e sostenibile dello spazio, la loro capacità di influenzare direttamente lo sviluppo tecnologico è limitata. UNOOSA e organizzazioni simili coordinano le politiche internazionali, promuovono linee guida per l'uso sostenibile dello spazio e supportano i paesi emergenti nello sviluppo delle loro capacità spaziali, ma spesso mancano delle risorse finanziarie e operative necessarie per competere direttamente con le grandi imprese o le agenzie spaziali nazionali. Tuttavia, il loro ruolo di facilitatori e promotori di cooperazione rimane essenziale per garantire che le attività spaziali siano condotte in modo responsabile e sostenibile a livello globale.

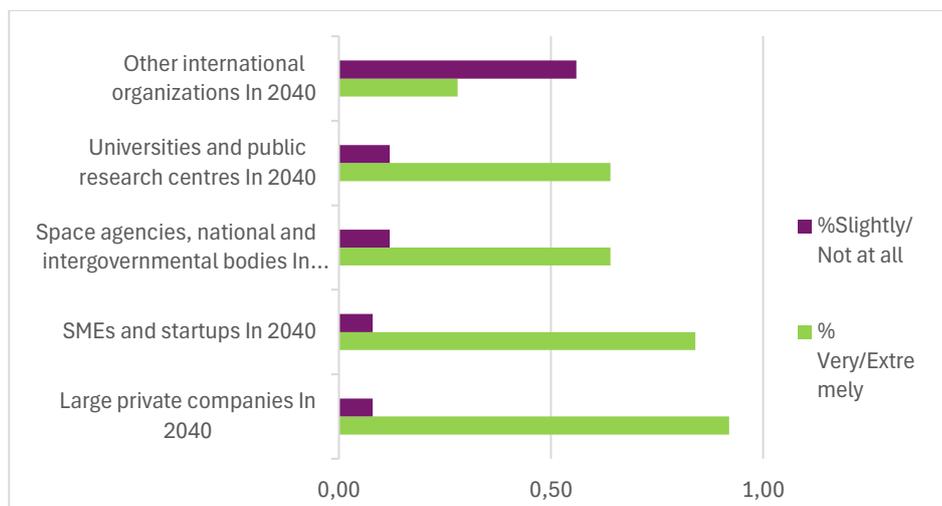


Figura 18: Statistiche relative all'importanza degli stakeholder proiettata nel 2040

Gli esperti del settore spaziale prevedono che entro il 2040 il contributo delle startup nel campo dei veicoli spaziali aumenterà in modo significativo. Questo trend è guidato da una serie di fattori che stanno ridisegnando il panorama dell'industria spaziale, rendendolo più dinamico e accessibile rispetto al passato. In primo luogo, l'avanzamento tecnologico può abbassare le barriere all'ingresso per le nuove imprese. Questo consentirebbe alle startup di competere con aziende consolidate, offrendo soluzioni innovative e spesso più efficienti. La democratizzazione dell'accesso alle tecnologie spaziali vuole aprire la strada a un'ampia gamma di applicazioni, dal turismo spaziale alle missioni di esplorazione scientifica, fino alla gestione dei satelliti per telecomunicazioni e osservazione della Terra (Nasa, 2020). In secondo luogo, il modello di finanziamento delle startup sta cambiando radicalmente. Il crescente interesse del venture capital per il settore spaziale ha portato a un aumento significativo degli investimenti privati. Fondi e investitori sono sempre più attratti dal potenziale di crescita e dai ritorni economici offerti dalle imprese spaziali emergenti. Questo flusso di capitali sta permettendo alle startup di sviluppare e testare nuove tecnologie, accelerando il loro ingresso nel mercato e la loro capacità di scalare le operazioni. Inoltre, la spinta verso la sostenibilità sta incentivando lo sviluppo di tecnologie spaziali più pulite e sostenibili, un settore in cui molte startup stanno già dimostrando una forte leadership. Dalla riduzione dei detriti spaziali all'uso di propellenti ecocompatibili, le nuove imprese sono in prima linea nell'affrontare le sfide ambientali legate alle attività spaziali. Infine, la globalizzazione del settore spaziale sta portando nuove opportunità per le startup in tutto il mondo. Paesi che tradizionalmente non erano attivi nello spazio stanno ora investendo in capacità spaziali, creando un mercato globale più diversificato e competitivo. Le startup stanno beneficiando di questo ambiente, trovando nicchie di mercato e collaborazioni internazionali che permettono loro di crescere e innovare (Space Economy 360, 2024).

In conclusione, mentre le grandi aziende private dominano il panorama degli stakeholder nel settore dei veicoli spaziali grazie alle loro risorse e capacità di innovazione su larga scala, le PMI, le startup, le agenzie spaziali nazionali e internazionali, e le organizzazioni internazionali contribuiscono in modo significativo e complementare al progresso e alla sostenibilità delle tecnologie spaziali. Di nuovo, la sinergia tra questi attori risulta fondamentale per affrontare le sfide complesse del settore e per promuovere un'esplorazione dello spazio che sia al contempo avanzata tecnologicamente e sostenibile.

4. Conclusioni

Le analisi condotte all'interno di questo elaborato hanno permesso di esplorare e comprendere un settore ricco di potenzialità ma anche di sfide significative. All'inizio del percorso, si è delineato un quadro generale della space economy, evidenziando le straordinarie opportunità offerte dal settore in merito all'innovazione tecnologica, la crescita economica e il miglioramento della qualità della vita. Si è trattato di un quadro ideale, generale e arricchito solo in seguito di tutta una serie di sfide e tematiche che sono risultate ricorrenti all'interno dell'elaborato. Solo attraverso un'analisi integrata di tutte le sezioni è stato possibile identificare e comprendere appieno queste questioni cruciali.

Un primo tema emerso con forza è la mancanza di finanziamenti adeguati. Nonostante il riconoscimento universale dell'importanza strategica delle attività spaziali, il settore continua a soffrire di un sottofinanziamento cronico. Questo deficit di risorse finanziarie ostacola lo sviluppo e l'implementazione di nuove tecnologie, rallenta i progressi nella ricerca e limita l'espansione delle iniziative commerciali, in particolare per quanto concerne il lavoro dei centri accademici e delle startup. La necessità di aumentare gli investimenti, sia pubblici che privati, è dunque cruciale per sostenere la crescita e la competitività della space economy. La finanza spaziale richiede un'iniezione di capitali significativa non solo per i progetti a breve termine, ma anche per quelli a lungo termine che mirano a rivoluzionare l'approccio alle risorse spaziali, alle missioni interplanetarie e alla colonizzazione dello spazio. Investimenti consistenti sono necessari per sviluppare infrastrutture di supporto come stazioni spaziali, basi lunari e piattaforme di lancio avanzate. Inoltre, l'integrazione di tecnologie emergenti come l'intelligenza artificiale, la robotica e la biotecnologia nello sviluppo di soluzioni spaziali richiede risorse finanziarie cospicue. Senza un adeguato flusso di finanziamenti, molte di queste iniziative rischiano di rimanere solo concetti teorici o progetti sperimentali senza mai raggiungere la piena maturità operativa. Parallelamente, la necessità di aggiornare il quadro normativo e l'urgenza di far rispettare le norme esistenti sono stati temi prevalenti nel corso dei capitoli. Le regolamentazioni attuali, spesso obsolete e inadeguate, non rispondono pienamente alle nuove realtà e alle sfide emergenti del settore. È indispensabile sviluppare un quadro normativo dinamico e flessibile che possa adattarsi rapidamente alle evoluzioni tecnologiche e alle esigenze operative. Inoltre, l'effettiva applicazione delle norme è altrettanto fondamentale per garantire la sicurezza, la sostenibilità e la trasparenza delle attività spaziali. La regolamentazione deve evolversi per coprire nuovi ambiti come la proprietà delle risorse spaziali, la responsabilità in caso di incidenti in orbita e la gestione dei detriti spaziali. È necessario un coordinamento internazionale per armonizzare le leggi nazionali e creare un sistema giuridico coerente e universalmente riconosciuto, sulla spinta soprattutto delle agenzie nazionali e internazionali. Questo include anche la necessità di creare organismi di monitoraggio e enforcement con autorità e risorse sufficienti per garantire che le normative vengano rispettate e che le violazioni siano adeguatamente sanzionate. In questo senso, la collaborazione tra gli stakeholder rappresenta un altro aspetto cruciale emerso dall'analisi. La complessità e l'interconnessione delle attività spaziali richiedono un approccio collaborativo che coinvolga governi, agenzie spaziali, industria privata, centri di ricerca e comunità accademica. Soltanto attraverso una cooperazione sinergica e coordinata sarà possibile affrontare le sfide globali e sfruttare appieno le opportunità offerte dalla space economy. La condivisione delle conoscenze, delle risorse e delle competenze tra gli attori è essenziale per promuovere l'innovazione e garantire un progresso sostenibile. Questo include anche la necessità di costruire partnership pubblico-private che possano massimizzare l'efficienza e l'efficacia delle risorse investite. Le collaborazioni internazionali sono altrettanto vitali, in quanto le missioni spaziali spesso superano le capacità di singoli paesi e richiedono sforzi congiunti. La cooperazione può anche mitigare i rischi associati alla duplicazione degli sforzi e alle rivalità geopolitiche, promuovendo

un ambiente più stabile e produttivo per le attività spaziali. Evidentemente, l'urgenza di procedere nella direzione della sostenibilità, nonostante la sfida dei costi, è stata forse il filo conduttore dell'intero elaborato. Le attività spaziali hanno un impatto significativo sull'ambiente, sia in termini di detriti spaziali sia in termini di emissioni e consumo di risorse. È quindi imperativo sviluppare tecnologie e pratiche operative che minimizzino l'impatto ambientale e promuovano una gestione sostenibile delle risorse spaziali. Sebbene i costi associati a tali innovazioni siano elevati, l'investimento in sostenibilità è imprescindibile per il futuro del settore. La sostenibilità spaziale deve essere integrata in tutte le fasi della progettazione e dell'implementazione delle missioni spaziali. Questo include l'adozione di materiali ecocompatibili, l'implementazione di strategie di riduzione dei detriti e lo sviluppo di tecniche avanzate per il riciclaggio e il riutilizzo delle risorse. La comunità internazionale deve inoltre lavorare insieme per creare standard e linee guida che promuovano le migliori pratiche in termini di sostenibilità ambientale. Le agenzie spaziali, le industrie e le istituzioni di ricerca devono impegnarsi a collaborare su progetti che dimostrino il potenziale delle tecnologie sostenibili e a condividere le conoscenze acquisite per accelerare l'adozione di queste soluzioni a livello globale. La fiducia nel potenziale delle politiche future nel mitigare gli impatti ambientali derivanti dalle attività spaziali, come la gestione dei rifiuti spaziali e l'utilizzo delle tecnologie satellitari per monitorare e mitigare i cambiamenti climatici, è stata espressa da un numero significativo di rispondenti. La percezione positiva è supportata dalla crescente consapevolezza delle agenzie spaziali internazionali riguardo alla necessità di sviluppare tecnologie sostenibili e pratiche di governance responsabile nello spazio. Le prospettive includono anche l'implementazione di normative più robuste per la sostenibilità nello spazio, la collaborazione internazionale rafforzata per affrontare le sfide comuni e l'adozione di pratiche migliori nel ciclo di vita delle tecnologie spaziali. L'implementazione di sistemi satellitari più avanzati, in questo senso, è emersa come una delle novità fondamentali per lo sviluppo di informazioni per la gestione sostenibile delle risorse naturali e per supportare le decisioni politiche mirate alla riduzione delle emissioni di gas serra (Stanley, 2019).

Infine, una riflessione importante riguarda l'uso del metodo Delphi nell'indagine. Questo metodo ha permesso di raccogliere opinioni e valutazioni da un gruppo selezionato di esperti, favorendo un processo iterativo di riflessione e consenso. L'impiego del metodo Delphi ha avuto implicazioni significative sull'indagine, poiché ha permesso di esplorare in profondità le percezioni degli esperti, identificando le aree di consenso e disaccordo e offrendo una comprensione più sfumata e dettagliata delle questioni analizzate. La scelta di coinvolgere 1920 esperti ha garantito una base ampia e diversificata, sebbene solo 63 abbiano manifestato la disponibilità a partecipare attivamente. Nonostante il numero relativamente basso di partecipanti finali, la qualità delle risposte ottenute è stata elevata, grazie alla diversificazione e la collaborazione, specie nelle risposte aperte, degli esperti coinvolti. Il metodo Delphi ha facilitato la raccolta di dati qualitativi preziosi, consentendo un'analisi approfondita e l'emergere di temi ricorrenti e cruciali per la comprensione delle dinamiche della space economy. La mole di informazioni raccolte online e sui libri di testo ha arricchito significativamente le statistiche ottenute durante l'indagine, consentendo una comprensione più approfondita delle dinamiche e dei fattori che modellano la space economy. Questo approccio ha permesso un'esplorazione dettagliata delle sfide e delle opportunità che caratterizzano il settore, offrendo una panoramica completa e articolata.

In conclusione, le indagini hanno confermato un panorama ricco di potenzialità inesplorate e di innovazioni che sfidano il limite dell'impossibile. Di pari passo, si sono evidenziate anche le sfide urgenti che richiedono risposte concrete e collettive e che, di fatto, costituiscono anche le tematiche centrali che plasmano il futuro della space economy: dalla necessità di finanziamenti adeguati e di un quadro normativo aggiornato, alla ricerca continua di soluzioni sostenibili che rispettino il delicato equilibrio del nostro ecosistema terrestre. Il percorso sviluppato all'interno di questa tesi ha permesso di

identificare e analizzare queste problematiche, offrendo una visione dettagliata e articolata delle dinamiche che caratterizzano il settore. Queste sfide, pur complesse, rappresentano l'opportunità per innovare, migliorare e garantire un futuro prospero e sostenibile per la space economy. Le ultime considerazioni sottolineano l'importanza di un approccio collaborativo tra il settore pubblico e privato per realizzare le potenzialità offerte dalla space economy, un tema che ha pervaso tutti i capitoli dell'elaborato. L'impegno collettivo e concertato degli attori coinvolti può trasformare queste sfide in trampolini di lancio per un progresso significativo che non solo realizzi il potenziale della space economy, ma che contribuisca anche a un futuro più sicuro, sostenibile e cooperativo per l'umanità intera. Questa conclusione vuole di catturare la magnificenza e le sfide del settore spaziale e affida alle parole di Clarke l'impegno e l'ambizione di questo elaborato.

*“Il limite del possibile può essere espanso dall'uomo solo e soltanto se
va al di là dell'impossibile!'. Con questo spirito di scoperta e
determinazione, ci prepariamo a trarre ispirazione dalle stelle mentre
intraprendiamo il prossimo capitolo della nostra esplorazione spaziale.”*
(Clarke)

Indice delle figure

Figura 1: Numero esperti per Genere.....	20
Figura 2: Numero esperti per Area Geografica	21
Figura 3: Numero esperti per Affiliazione	22
Figura 4: Numero esperti per Anni di Esperienza	23
Figura 5: Statistiche relative alle condizioni attuali.....	30
Figura 6: Statistiche relative alle condizioni proiettate nel 2040.....	31
Figura 7: Statistiche relative alle condizioni attuali.....	36
Figura 8: Statistiche relative alle condizioni proiettate nel 2040.....	37
Figura 9: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi.....	47
Figura 10: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040	48
Figura 11: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi.....	55
Figura 12: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040	57
Figura 13: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi.....	62
Figura 14: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040	63
Figura 15: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi.....	66
Figura 16: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040	67
Figura 17: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders oggi.....	72
Figura 18: Statistiche relative all'importanza degli stakeholders proiettata nel 2040	73

Bibliografia

- (s.d.). Tratto da Ministero delle Imprese e del Made in Italy:
<https://www.mimit.gov.it/index.php/it/impresa/competitivita-e-nuove-imprese/space-economy>
- (s.d.). Tratto da Osservatori Digital Innovation: <https://www.osservatori.net/it/>
- American Institute of Physics. (s.d.). Women in STEM Fields: A Statistical Overview.
- Asi.it. (2020). Tratto da ARTEMIS, SIGLATO IL PRIMO ACCORDO MULTILATERALE DI COOPERAZIONE INTERNAZIONALE: <https://www.asi.it/2020/10/artemis-siglato-il-primo-accordo-multilaterale-di-cooperazione-internazionale/>
- Bank of America Merrill Lynch. (2017). To Infinity and Beyond: Global Space Primer.
- China's Space Program: A 2021 Perspective. (s.d.). Tratto da https://english.www.gov.cn/archive/whitepaper/202201/28/content_WS61f35b3dc6d09c94e48a467a.html
- Clarke, A. (s.d.).
- Darnis, J. P. (2018). Access to Space: Challenges and Policy Options for Europe. Tratto da <https://www.iai.it/it/pubblicazioni/access-space-challenges-and-policy-options-europe>
- eai.enea.it. (s.d.). Tratto da <https://www.eai.enea.it/>
- European Commission. (2022). Access to Space. Tratto da https://defence-industry-space.ec.europa.eu/access-space_en
- European Space Policy. (s.d.). Tratto da Esa.int: <https://www.esa.int>
- Government of Canada. (2019). A New Space Strategy for Canada.
- Guedes, A. (2024). ICT Opportunities in the Space Economy - Bridging the Cosmos and Earth. Tratto da <https://blog-idceurope.com/ict-opportunities-in-the-space-economy/>
- Helmer. (1967). Analysis of the Future.
- L'industria dello spazio è l'opportunità del secolo: al via la più grande piattaforma al mondo per la formazione. (2022). Tratto da <https://innovazione.tiscali.it/disruptive-innovation/articoli/industria-spazio-maggiore-piattaforma-mondo-formazione/>
- Linstone, T. (2002). The Delphi Method: Techniques and Applications.
- Liou, J.-C. (2010). An Assessment of the Current LEO Debris Environment and the Need for Active Debris Removal. Tratto da <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100017146/downloads/20100017146.pdf>
- Lyall, F. &. (2016). Space Law: A Treatise. Routledge.
- Nasa. (2020). New NASA Partnerships to Mature Commercial Space Technologies, Capabilities. Tratto da <https://www.nasa.gov/news-release/new-nasa-partnerships-to-mature-commercial-space-technologies-capabilities/>

- NASA Sending Five Payloads to Moon on Astrobotic's Peregrine Lander. (2024). Tratto da <https://www.nasa.gov/missions/artemis/clps/nasa-sending-five-payloads-to-moon-on-astrobotics-peregrine-lander/>
- NT+ Diritto. (s.d.). Tratto da Space Law e la Space Economy: la Nuova Frontiera: <https://ntplusdiritto.ilsole24ore.com/art/space-law-e-space-economy-nuova-frontiera-AESKkil>
- OECD Publishing, Organisation for Economic Co-operation and Development Staff. (2012). OECD Handbook on Measuring the Space Economy.
- Panoramica dell'iniziativa "Accesso allo spazio per tutti". (s.d.). Tratto da <https://newspaceconomy.ca/2023/11/04/overview-of-the-access-to-space-for-all-initiative/>
- Prefazione "L'industria italiana dello Spazio. Ieri, oggi e domani". (s.d.). Tratto da <https://www.mise.gov.it/index.php/it/per-i-media/pubblicazioni/2041575-l-industria-italiana-dello-spazio-ieri-oggi-e-domani>
- Research and Development. (s.d.). Tratto da esa.int: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Life_Support_and_Physical_Sciences/Research_and_development
- Space Economy 360. (2024). Space e venture capital, ecco su cosa puntano gli investitori. Tratto da <https://www.spaceeconomy360.it/tecnologie-spaziali/space-e-venture-capital-ecco-su-cosa-puntano-gli-investitori/>
- Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective. (2020). OECD Publishing.
- Stanley, M. (2019). Space: Investing in the Final Frontier.
- Starek, J. A. (2015). Starek, J. A., Açıkmeşe, B., Nesnas, I. A., & Pavone, M. (2015). Spacecraft autonomy challenges for next-generation space missions. In *Advances in Control System Technology for Aerospace Applications*.
- Stockley, A. (2023, Aprile). The Rise of Reusable Rockets: Transforming the Economics of Space Travel. Tratto da <https://www.kdcresource.com/insights-events/the-rise-of-reusable-rockets-transforming-the-economics-of-space-travel/>
- Survey Monkey. (s.d.). Tratto da <https://it.surveymonkey.com/mp/likert-scale/>
- The White House. (2020). National Space Policy. (s.d.).
- United Nations, Officer fo Outer Space Affairs. (2021, May). <https://www.unoosa.org/>. Tratto da <http://www.unoosa.org/documents/pdf/studies/Space-Sustainability-Stakeholder-Engagment-Study-Outcome-Report.pdf>
- UNOOSA. (2023). Sustainability in Space: International Cooperation and Policy.
- US Department of Defense. (2020). Defense Space Strategy. (s.d.).
- Von der Dunk, F. G. (2015). Handbook of Space Law. Edward Elgar Publishing.

Ringraziamenti