



Uno studio sulle emissioni di gas serra, analizzando il potenziale di cinque sistemi ferroviari di trasporto passeggeri per raggiungere gli obiettivi dell'UE

A study on greenhouse gas emissions, analyzing the potential of five rail transport passenger systems for meeting EU targets

Marin MARINOV
Kaushik MYSORE
Benjamin WOOD

Sommario - Con la crescente preoccupazione per il riscaldamento globale e il cambiamento climatico, questo documento mira a studiare cinque sistemi di trasporto ferroviario passeggeri in Europa riguardo alle loro emissioni di gas serra. Si confrontano i paesi tra loro per determinare quali stanno ottenendo i risultati migliori e i motivi alla base di ciò. Si analizzano i paesi per un periodo di dieci anni per verificare se ci sono tendenze che si formano con il passare del tempo. Le informazioni raccolte sono quindi utilizzate per produrre due diverse previsioni sulle emissioni di gas a effetto serra sulle ferrovie per esaminare il potenziale di ciascun paese per raggiungere gli obiettivi di emissione dell'Unione europea. Si è costatato che la Finlandia, la Svezia e il Regno Unito mostrano segni molto positivi di poter raggiungere gli obiettivi di emissione di gas a effetto serra nel 2030 e nel 2050.

Parole chiave: emissioni di gas serra, sistemi di trasporto ferroviario passeggeri, analisi dei dati, previsioni.

1. Introduzione

L'Unione Europea e i suoi 28 Stati membri hanno tutti firmato la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici. Questo trattato internazionale sull'ambiente include il Protocollo di Kyoto e l'Accordo di Parigi, che sono in atto per ridurre le emissioni di gas a effetto serra e limitare il riscaldamento globale al di sotto di due gradi Celsius. Per garantire che siano compiuti progressi adeguati per rispettare l'impegno, la Commissione Europea ha fissato un obiettivo a lungo termine per ridurre entro il 2050 le emissioni complessive di gas a effetto serra all'80% sotto i livelli del 1990 [4]. È stato inoltre fissato un obiettivo intermedio per il 2030 per ridurre i gas a effetto serra nel settore dei trasporti del 40% rispetto al livello base del 1990. Si indica che l'uso di carburanti più puliti e di veicoli più efficienti non risolverà da solo il problema delle emissioni, ma sarebbe probabilmente necessario un passaggio alle modalità di trasporto pubblico di passeggeri come la ferrovia.

Le emissioni prodotte dalle ferrovie sono tra le più basse nel settore dei trasporti. Tuttavia, poiché sempre più per-

Summary - With increasing concern over global warming and climate change, this paper aims to investigate five rail passenger systems in Europe with respect to their greenhouse gas emissions. The countries are compared to each other to determine which are performing the best and the reasons behind this. The countries are analysed over a ten years period to investigate if there are trends forming as time progresses. The information collected is then used to produce two different forecasts for greenhouse gas emissions on the railways to look at the potential each country has for meeting European Union emissions targets. It is found that Finland, Sweden and the United Kingdom are showing very positive signs of being able to achieve the greenhouse gas emission targets in 2030 and 2050.

Key words: green gas emissions, rail passenger systems, data analysis, forecasts.

1. Introduction

The European Union and its 28 member states have all signed the United Nations Framework Convention on Climate Change. This international environmental treaty includes the Kyoto Protocol and the Paris Agreement, which are in place to reduce greenhouse gas emissions and limit global warming to below two degrees Celsius. To ensure adequate progress is made to meet the commitment, the European Commission has set a long-term goal to reduce overall greenhouse gas emissions to 80% below 1990 levels by 2050 [4]. An intermediate goal has also been set for 2030 to reduce greenhouse gases in the transport sector by 40% from the 1990 baseline level. It is suggested that using cleaner fuels and more efficient vehicles will not solve the emissions problem alone, instead a shift to public passengers transport modes such as rail would likely be required.

The emissions produced by the railways are amongst the lowest in the transport sector. However as more people were encouraged to use the railways, these emissions have come under increased scrutiny. Interested reader is referred to [3], [10], [11], [17], [18]. The aim of this paper is to investigate the current performance of five different rail passenger sys-

sono state incoraggiate a utilizzare le ferrovie, queste emissioni sono state oggetto di un maggiore controllo. Il lettore interessato può fare riferimento a [3], [10], [11], [17], [18]. Lo scopo di questo documento è di studiare le prestazioni attuali di cinque diversi sistemi di trasporto ferroviario passeggeri in Europa e il loro contributo ai gas serra nell'atmosfera. I dati sono quindi analizzati per determinare se ciascun paese è sulla buona strada per raggiungere gli obiettivi di emissione stabiliti dall'Unione Europea.

L'obiettivo finale di questo documento è studiare le tendenze dei gas a effetto serra prodotti dalle ferrovie per cinque paesi e confrontare queste tendenze con le previsioni degli obiettivi dell'Unione Europea. I risultati di questo confronto indicano quindi se gli obiettivi di emissione sono realistici o irraggiungibili. Alcune analisi dei dati per le ferrovie europee sono state in precedenza studiate per valutare le prestazioni del trasporto ferroviario passeggeri [12]. Anche la ferrovia merci è stata studiata in modo simile con un'analisi delle serie storiche [16]. Sono state analizzate e confrontate le emissioni dirette e indirette dal materiale rotabile nel Regno Unito per tre modalità, vale a dire diesel, elettrico e bi-modale [3]. Al fine di studiare il rendimento attuale delle ferrovie, utilizziamo approcci simili analizzando le prestazioni del sistema di trasporto ferroviario passeggeri pertinente utilizzando alcuni indicatori chiave fondamentali di prestazione.

L'esercizio ferroviario è collegato all'utilizzo della rete ferroviaria. Una rete ferroviaria vasta e ben mantenuta sarebbe inutile senza treni che vi circolano. Si considera il numero di treni chilometro l'anno, che mostra quanto traffico e quanti servizi sono offerti. Poiché operiamo in un traffico misto in Europa, si analizzano i dati riguardanti i passeggeri chilometro e le tonnellate merci chilometro per studiare quanti viaggi utili stanno compiendo i treni e quindi valutare il grado di utilizzo dell'infrastruttura ferroviaria in ciascun paese.

Nel tempo si analizzano le emissioni specifiche di gas a effetto serra dei treni su ciascuna rete ferroviaria per verificare se vi sia una tendenza al rialzo o al ribasso. Si confrontano i cinque paesi in esame per vedere se qualcuno ha emissioni significativamente maggiori/minori rispetto ad altri.

I veicoli elettrici sono spesso considerati molto meno inquinanti rispetto ai veicoli alimentati a combustibili fossili. Si studia quindi la percentuale di linee ferroviarie elettrificate e si confronta con l'efficienza della generazione di elettricità in ciascun paese. Si esegue un confronto con le auto elettriche per vedere quale modo di trasporto dovrebbe essere ulteriormente incoraggiato.

2. Metodologia

2.1. Selezione del Paese

L'Europa è un grandissimo territorio con enormi differenze geografiche e politiche da una nazione all'altra. Il

tems in Europe and their contributions to the greenhouse gases into the atmosphere. The data is then analysed to determine whether or not each country is on track to meet the emissions targets set by the European Union.

The ultimate objective for this paper is to study the trends for the greenhouse gases produced by the railways for five countries and compare these trends to the forecast to the European Union targets. The results from this comparison then indicate whether the emissions targets are realistic or unachievable. Some data analysis for the European railways has previously been studied to assess the performance of passenger rail [12]. Freight rail has also been studied in a similar way with a time series analysis [16]. Analysed and compared direct and indirect emissions from rolling stock in the UK for three modes, namely: diesel, electric and bi-mode [3]. In order to investigate how the railways are currently performing, we employ similar approaches analysing relevant rail passenger system performance using some crucial key performance indicators.

Train operations are linked to rail network utilisation. A vast and well maintained rail network would be of no use without any trains running on it. The number of train kilometres per year is considered, showing how much traffic and how many services are being offered. Because we operate mixed traffic in Europe, the data for passenger kilometres and freight tonne kilometres is analysed to study how many useful journeys the trains are completing and hence investigate how well the rail infrastructure in each country is utilised.

The specific greenhouse gas emissions from trains on each rail network are analysed over time to see if there is any upward or downward trend. The five countries under study are compared to see if any have significantly greater/fewer emissions than others.

Electric vehicles are often considered to be far less polluting than vehicles powered by fossil fuels. The percentage of electrified rail lines are therefore investigated and compared to the efficiency of electricity generation in each country. A comparison is made with electric cars to see which transport mode should be further encouraged.

2. Methodology

2.1. Country selection

Europe is a huge landmass with vast differences in geography and politics from one nation to another. The United Kingdom has the second highest gross domestic product in Europe and has a temperate climate, therefore it would be inappropriate to compare the United Kingdom to countries with smaller economies and Mediterranean climates such as Portugal or Cyprus. The countries, which are going to be used as a comparator in this study are the Scandinavian countries of Norway, Sweden and Denmark, with the inclusion of Finland. These countries are widely regarded as being forward thinking in terms of technology and the environment, hence it is our goal to study how the rail systems of these five countries compares in terms of carbon emissions.

Regno Unito ha il secondo prodotto interno lordo più alto in Europa e ha un clima temperato, quindi sarebbe inappropriato paragonare il Regno Unito a paesi con economie più piccole e climi mediterranei come il Portogallo o Cipro. I paesi che saranno utilizzati come comparatori in questo studio sono i paesi scandinavi di Norvegia, Svezia e Danimarca, compresa la Finlandia. Questi paesi sono ampiamente considerati lungimiranti in termini di tecnologia e ambiente, quindi il nostro obiettivo è studiare come i sistemi ferroviari di questi cinque paesi si confrontano in termini di emissioni di carbonio.

La Fig. 1 mostra il prodotto interno lordo pro capite per le nazioni europee. Sono state evidenziate le nazioni che caratterizzano questo studio. Come si può vedere, tutti i paesi hanno un PIL pro capite più elevato rispetto alla media dell'Unione europea. Il Regno Unito ha il PIL pro capite più basso tra i cinque paesi selezionati, nonostante abbia il secondo PIL più alto dell'Unione Europea.

2.2. Fonti dei dati

Per garantire che i risultati di questo lavoro siano credibili e rappresentino equamente ogni paese, è importante ottenere dati da una fonte attendibile. La maggior parte dei dati proviene da Eurostat. Eurostat è una direzione generale della Commissione Europea ed è l'ufficio statistico ufficiale dell'Unione Europea. Eurostat fornisce dati su un'ampia varietà di argomenti, dall'economia all'ambiente, alla scienza e alla tecnologia. I dati sono raccolti dai 28

Fig. 1 shows the gross domestic product per capita for European nations. Highlighted are the nations which feature in this study. As it can be seen, all the countries have a higher GDP per capita than the European Union average. The United Kingdom has the lowest GDP per capita out of the five countries selected, despite having the second highest GDP in the European Union.

2.2. Sources of data

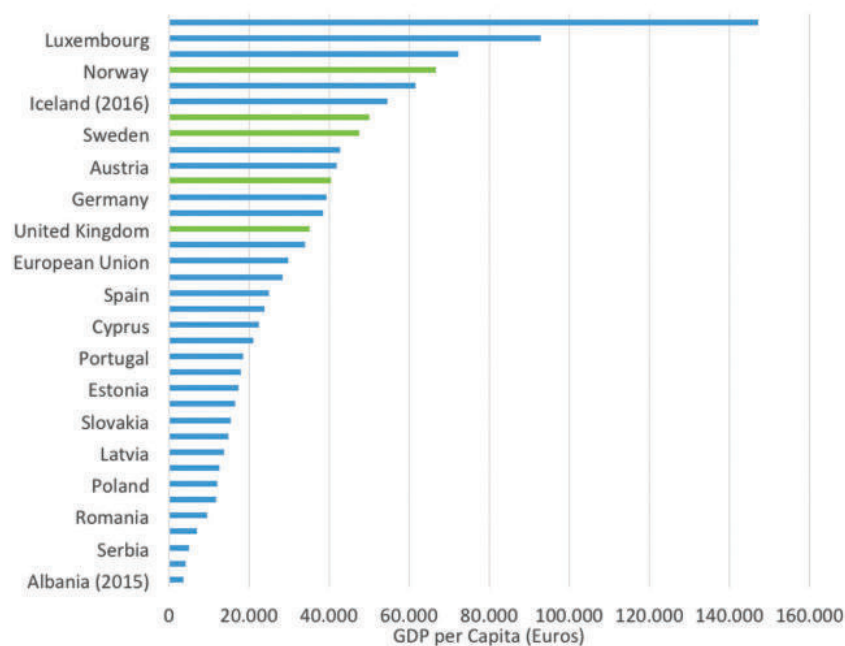
To ensure the findings of this paper are credible and fairly represent each country, it is important to obtain data from a reliable source. The majority of the data has been sourced from Eurostat. Eurostat is a Directorate-General of the European Commission and is the official statistical office of the European Union. Eurostat provides data on a wide variety of topics from the economy to the environment to science and technology. The data is collected from the 28 European Union member states and the neighbouring European countries. This means that Norway, despite not being an EU member state, still features in the data.

3. Comparison analysis through selected KPIs

3.1. KPI 1 – Train operations

The number of trains in operation is a good indicator of how well a train service is running. A rail network with lots of trains would suggest that the country is utilising the infrastructure as best as it can. Fig. 2 shows the density of trains on each rail network. This was calculated by dividing the total number of kilometres travelled by trains annually and dividing it by the length of track in each country. This shows the average number of train that will pass over a kilometre of track each year. The United Kingdom has the highest density, showing that more services are being offered on its network. In addition, the train density on the rail network in the United Kingdom has steadily increased over the ten year period. The country with the lowest train density is Finland and has been decreasing between 2006 and 2015.

The rail networks are not exclusively run for passenger travel, but also to transport goods domestically and internationally. Fig. 3 shows the percentage of the total train kilometres travelled by freight trains in each country. Denmark and the United Kingdom have very low freight traffic on their networks with 4.6% and 6.6% respectively. Finland and Sweden have the greatest percentage of freight trains on their



(Fonte: Eurostat "Dati 2017 se non diversamente specificato" -
Source: Eurostat "2017 data unless otherwise specified")

Figura 1 – Prodotto interno lordo pro capite per i paesi europei.
Figure 1 – Gross domestic product per capita for European countries.

stati membri dell'Unione Europea e dai paesi limitrofi dell'Europa. Ciò significa che la Norvegia, pur non essendo uno Stato membro dell'UE, è ancora presente nei dati.

3. Analisi di confronto tramite KPI (indicatori chiave di prestazione) selezionati

3.1. KPI 1 - Esercizio treni

Il numero di treni in esercizio è un buon indicatore del funzionamento di un servizio ferroviario. Una rete ferroviaria con molti treni suggerirebbe che il paese stia utilizzando l'infrastruttura nel miglior modo possibile. La Fig. 2 mostra la densità dei treni su ciascuna rete ferroviaria. Questo è stato calcolato dividendo il numero totale di chilometri percorsi dai treni ogni anno e dividendolo per la lunghezza del tracciato in ciascun paese. Ciò mostra il numero medio di treni che transiteranno ogni anno su un chilometro. Il Regno Unito ha la più alta densità, dimostrando che sono offerti un maggior numero servizi sulla sua rete. Inoltre, la densità dei treni sulla rete ferroviaria nel Regno Unito è aumentata continuamente nel corso dei dieci anni. Il paese con la più bassa densità di treni è la Finlandia ed è diminuito tra il 2006 e il 2015.

Le reti ferroviarie non sono operate esclusivamente per i viaggi passeggeri, ma anche per il trasporto di merci a livello nazionale e internazionale. La Fig. 3 mostra la percentuale dei treni chilometro totali percorsi dai treni merci in ciascun paese. La Danimarca e il Regno Unito hanno un traffico merci molto ridotto sulle loro reti con rispettivamente il 4,6% e il 6,6%. La Finlandia e la Svezia hanno la maggiore percentuale di treni merci sulle loro reti con un margine considerevole. Ogni paese sta seguendo la stessa tendenza con la percentuale di treni merci in calo. Ciò potrebbe essere attribuito a un aumento dei servizi passeggeri offerti, riducendo la percentuale di treni merci, oppure potrebbe essere che i treni merci stiano diventando più lunghi e più efficienti in termini di volume trasportato. Se è possibile trasportare una maggiore massa di merci su un solo treno, è necessaria una minore circolazione dei

networks by a considerable margin. Every country is following the same trend with the percentage of freight trains declining. This could be attributed to an increase in passenger services offered, decreasing the proportion of freight trains, or it could be that freight trains are becoming longer and more efficiently packed. If a greater mass of freight can be transported on one train, less trains need to be run. This will

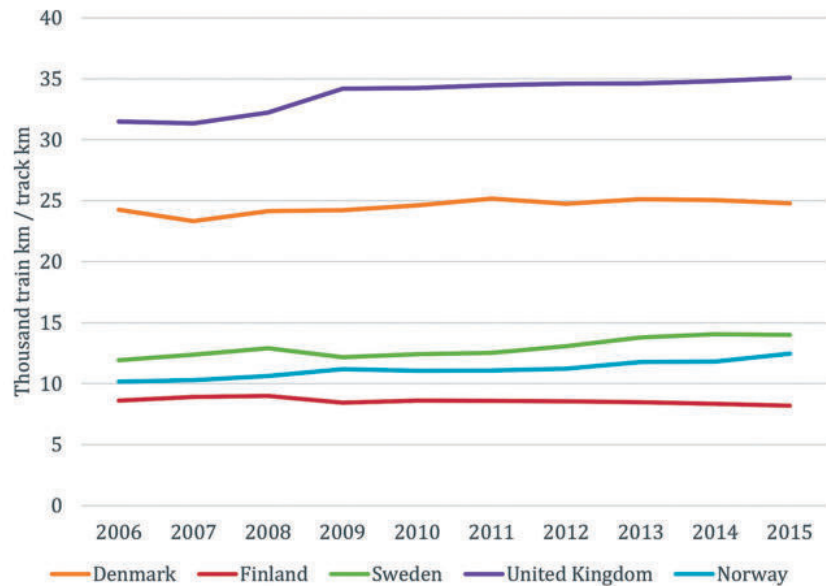
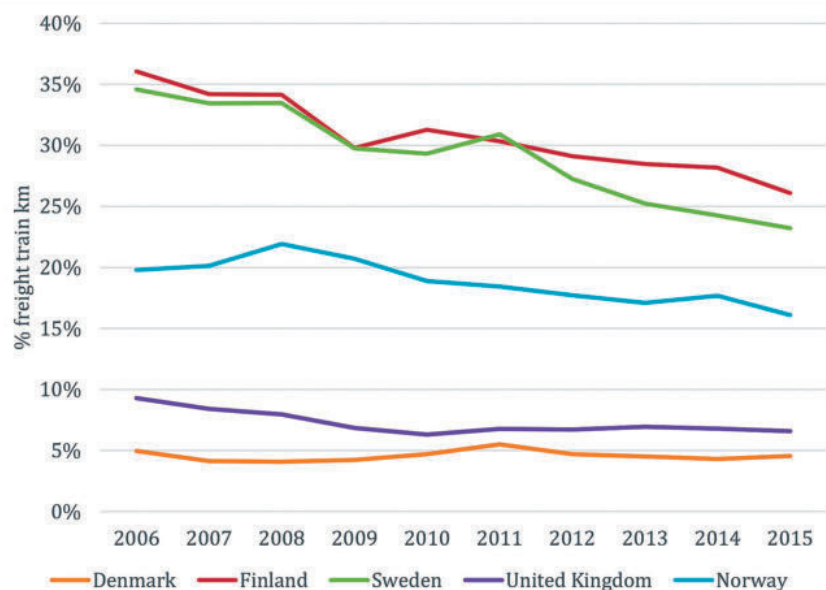
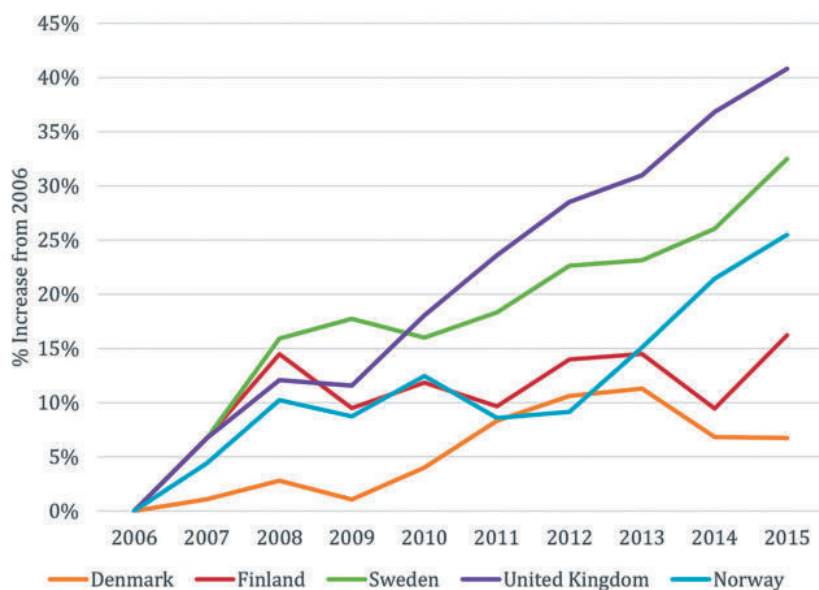


Figura 2 – Densità di treni su ciascuna rete ferroviaria (treno km totale / tracciato km totale).
Figure 2 – Density of trains on each rail network (total train km/total track km).



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 3 – Percentuale di treno km totali percorsi dai treni merci.
Figure 3 – Percentage of the total train km travelled by freight trains.



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 4 – Aumento percentuale dei passeggeri chilometro ferroviari annui rispetto ai livelli del 2006.

Figure 4 – Percentage increase in annual rail passenger kilometres compared to 2006 levels.

treni. Ciò avrà un effetto positivo sulla riduzione del numero di gas serra prodotti.

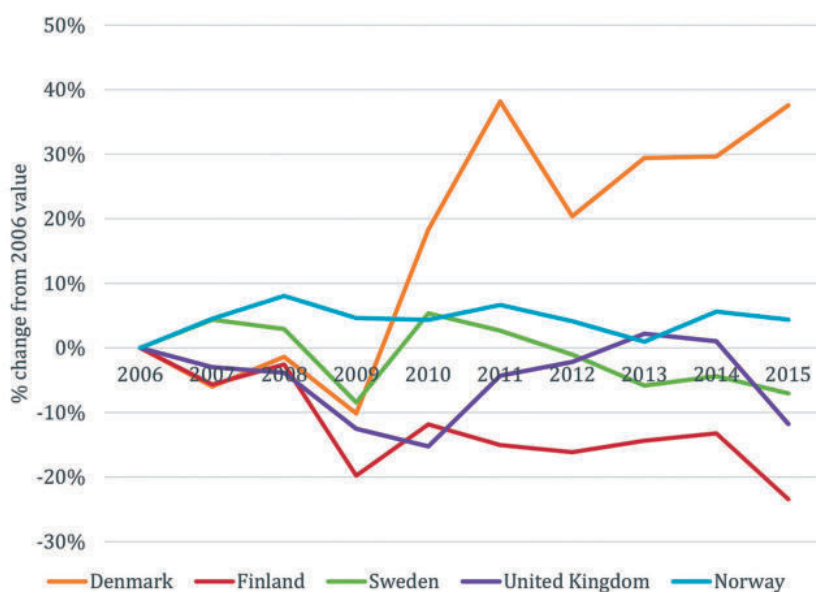
Un modo proattivo per determinare i viaggi utili effettuati con la ferrovia è di esaminare i chilometri percorsi dai passeggeri. Questa è una quantità che rappresenta lo spostamento di un passeggero di un chilometro. L'equivalente merci di questo indicatore sono i tonnellate chilometro percorsi. La Fig. 4 mostra i dati per il trasporto ferroviario di passeggeri e la Fig. 5 mostra i dati per il trasporto ferroviario di merci. I dati sono stati normalizzati prendendo i dati del 2006 come base e trovando la variazione percentuale rispetto a quell'anno. Guardando i grafici contemporaneamente si osserva che il trasporto merci su rotaia e il trasporto ferroviario passeggeri stanno andando in direzioni molto diverse.

Tutti i paesi hanno chilometri annuali di trasporto ferroviario passeggeri che aumentano a un ritmo molto costante. Il Regno Unito ha registrato il maggiore aumento con il 40,8% di passeggeri chilometro in più raggiunto nel 2015 rispetto al 2006. La Danimarca ha registrato il più lento aumento di passeggeri chilometro con

have a positive effect on decreasing the number of greenhouse gases produced.

A proactive way to determine the useful journeys made on the railway is to look at the passenger kilometres travelled. This is a quantity representing the movement of one passenger by one kilometre. The freight equivalent of this indicator is tonne kilometres travelled. Fig. 4 shows the data for passenger rail and Fig. 5 shows the data for rail freight. The data has been normalised by taking the 2006 data as a baseline and finding the percentage change from that year. Looking at the graphs simultaneously it shows that rail freight and passenger rail are going in very different directions.

All of the countries have annual rail passenger kilometres that are increasing at a very steady rate. The United Kingdom has seen the largest increase with 40.8% more passenger kilometres completed in 2015 than 2006. Denmark has had the slowest increase in passenger kilometres with only a 6.7% increase over the ten year period. Interestingly, Denmark is the only country with a dramatic increase in freight tonne kilometres; all of the other countries have remained roughly constant or have decreased. Despite this, however, freight rail remains a very small per-



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 5 – Variazione percentuale in tonnellate chilometro percorsi con la ferrovia rispetto ai valori del 2006.

Figure 5 – Percentage change in tonne kilometres travelled on the railway compared to 2006 values.

solo un aumento del 6,7% nel decennio. È interessante notare che la Danimarca è l'unico paese con un drammatico aumento di tonnellate merci chilometro; tutti gli altri paesi sono rimasti pressoché costanti o sono diminuiti. Nonostante ciò, tuttavia, il trasporto ferroviario di merci rimane una percentuale molto piccola dei treni chilometro in Danimarca. Nel 2008 si è registrato un calo rilevante del tasso con cui il trasporto ferroviario passeggeri stava aumentando. Nello stesso anno anche il trasporto ferroviario di merci è notevolmente diminuito. Questa tendenza è molto probabilmente attribuita alla crisi finanziaria globale del 2008. Il trasporto ferroviario passeggeri ne sarebbe stato influenzato. Molte persone sarebbero rimaste senza lavoro durante questo periodo, causando una diminuzione del numero di pendolari che usano i treni. Le persone che usano i treni per il tempo libero potrebbero aver deciso di non poter più farlo.

Anche il trasporto ferroviario di merci sarebbe stato influenzato giacché il volume delle merci, che era necessario trasportare, sarebbe diminuito in modo significativo. Dal 2009, il trasporto ferroviario passeggeri si è ripreso, in particolare per il Regno Unito. Con l'aumento del tasso di occupazione e la ripresa del lavoro, forse decisero che le auto erano troppo costose e quindi utilizzarono la rete ferroviaria. Inoltre, le persone potrebbero aver deciso che le vacanze all'estero fossero una spesa superflua e invece hanno deciso di utilizzare la rete ferroviaria per una "vacanza a casa". Ciò avrebbe un vantaggio particolare per le linee ferroviarie rurali poiché le persone cercano di lasciare le città a favore della campagna.

3.2. KPI 2 - Emissioni di gas serra

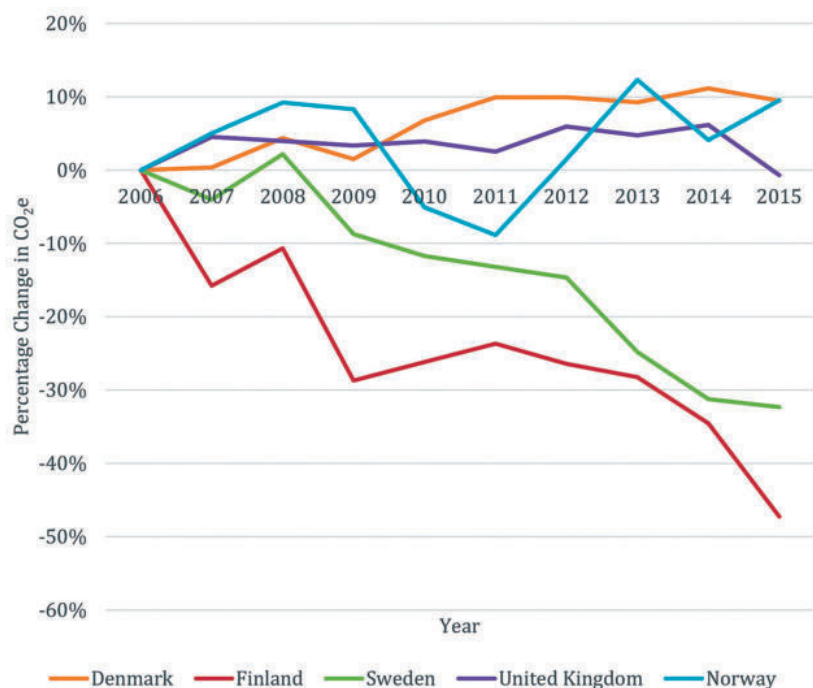
Tra le statistiche sulle emissioni di gas a effetto serra, osserviamo quella riguardante le emissioni annue totali di gas a effetto serra derivanti dalla combustione del carburante dei treni. Le differenze tra i paesi in termini di dimensioni e utilizzo delle reti ferroviarie comportano una grande disparità nelle emissioni di gas a effetto serra. Per questo motivo i dati sono normalizzati come in precedenza, prendendo come base i valori del 2006 e calcolando la variazione percentuale rispetto a quell'anno. Questi dati sono mostrati nella Fig. 6 che indica che Svezia e Finlandia hanno ridotto significativamente i gas serra prodotti dalla combustione di carburante delle ferrovie, rispettivamente del -32,3% e del -47,2% rispetto ai livelli del 2006. Ciò dimostra che entrambi i paesi hanno dimostrato un grande impegno

percentage of the train kilometres in Denmark. In 2008 there was a significant drop in the rate at which passenger rail was increasing. In the same year rail freight significantly declined as well. This trend is most likely attributed to the global financial crisis of 2008. Passenger rail would have been affected by this. Many people will have been made unemployed during this period, causing a decrease in the number of commuters using trains. People who use the trains for leisure may have decided that they could no longer do so.

Rail freight would have also been affected as the volume of goods, which needed transporting would have significantly decreased. From 2009 onwards, passenger rail recovered, particularly for the United Kingdom. As the employment rate increased and people regained jobs, perhaps they decided that cars were too expensive and hence used the rail network. In addition, people may have decided that foreign holidays were an unnecessary expense and instead decided to use the rail network for a 'staycation'. This would have a particular benefit towards rural train lines as people look to leave the cities in favour of the countryside.

3.2. KPI 2 – Greenhouse gas emissions

Among the statistics for greenhouse gas emissions, we look at the one being the total annual greenhouse gas emissions from fuel combustion in trains. The differences between the countries in terms of the size and usage of the rail



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 6 – Variazione percentuale delle emissioni annue di gas a effetto serra dalla combustione di carburante delle ferrovie rispetto ai livelli del 2006.

Figure 6 – Percentage change in annual greenhouse gas emissions from fuel combustion in railways compared to 2006 levels.

nel ridurre la quantità d'inquinamento prodotta dai loro treni. Il Regno Unito ha mostrato una variazione quasi trascurabile a -0,7% nel periodo di 10 anni. I gas serra prodotti dalle ferrovie in Danimarca e Norvegia sono aumentati del 9,5% tra il 2006 e il 2015.

Sebbene non sembri positivo che solo due dei paesi siano riusciti a ridurre le emissioni di gas a effetto serra prodotte dalle ferrovie in questo periodo di dieci anni, ciò non tiene conto del livello di utilizzo delle ferrovie.

Invece della quantità assoluta di emissioni di gas a effetto serra prodotte, è possibile ottenere maggiori informazioni dalla considerazione delle emissioni specifiche. Le emissioni specifiche sono le emissioni di gas a effetto serra prodotte per passeggero chilometro o per tonnellata chilometro per il trasporto merci. Sfortunatamente a causa di fonti di dati limitate e incomplete disponibili pubblicamente che differenziano tra le emissioni di un treno passeggeri e di un treno merci, in quest'analisi si inquadrano le emissioni specifiche misurate per passeggero chilometro, senza considerare le tonnellate merci chilometro.

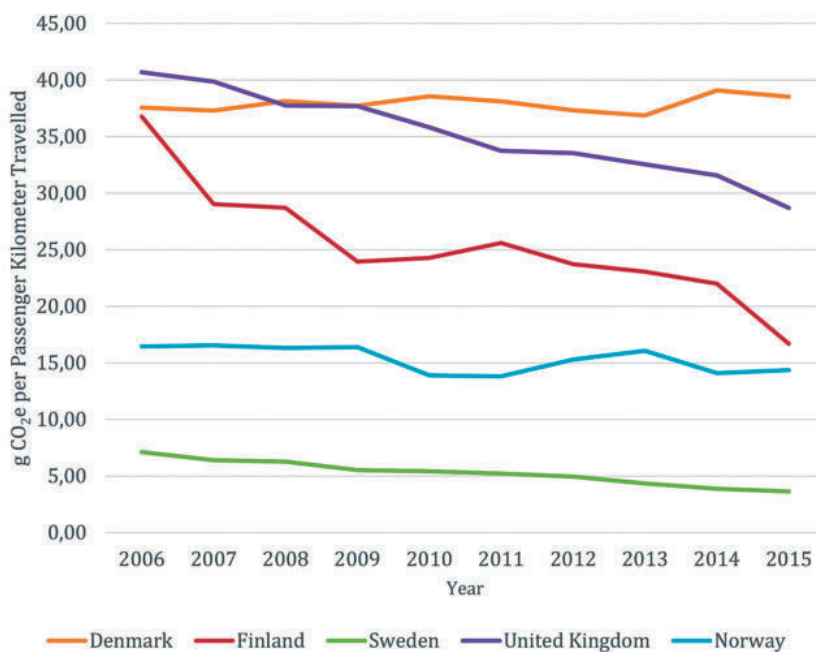
La Fig. 6 mostra la quantità di CO₂e emessa dalla combustione del carburante delle ferrovie per passeggero chilometro percorso ed è più indicativa dell'efficacia di ciascun sistema ferroviario in quanto mostra le conseguenze del trasporto di un passeggero per un chilometro. Nello specifico, la Fig. 6 mostra che la Svezia ha sempre, di gran lunga, emesso il minor quantitativo di gas serra per PKT, ed è riuscita a ridurlo costantemente a un sorprendente 3,6g CO₂e/PKT. I successivi pochi gas a effetto serra per PKT provengono dalla Norvegia, ma le loro emissioni sono ancora quattro volte superiori a quelle della Svezia con 14,4g di CO₂e/PKT. La Norvegia non ha visto molti cambiamenti nella quantità di gas serra emessi per PKT dal 2006, è rimasta ragionevolmente costante in questo periodo. Danimarca, Finlandia e Regno Unito hanno iniziato il periodo di 10 anni con valori di emissione relativamente simili. La Danimarca ha visto un cambiamento trascurabile nelle emissioni per PKT, aumentando leggermente a 38,5g CO₂e/PKT - un valore oltre 10 volte superiore a quello della Svezia. Nel 2015 il Regno Unito ha costantemente ridotto ogni anno le emissioni per PKT a 28,7g CO₂e/PKT. La Finlandia ha registrato il calo più drammatico, scendendo quasi ai livelli della Norvegia a 16,6g CO₂e/PKT.

La Fig. 7 mostra i gas serra prodotti dalla combustione di carburante dei treni. I treni elettrici non bruciano alcun combustibile all'interno del treno, quindi le emissioni indirette derivanti dalla generazione di elettricità

networks mean there is a great disparity in greenhouse gas emissions. For this reason the data is normalised in the same way as previously, taking the 2006 values as a baseline and calculating the percentage change from that year. This data is displayed in Fig. 6, which shows that Sweden and Finland have significantly reduced the greenhouse gases produced by fuel combustion in railways, -32.3% and -47.2% respectively compared to their 2006 levels. This shows that both countries have demonstrated a great commitment to decreasing the amount of pollution produced by their trains. The United Kingdom has shown an almost negligible change at -0.7% in the 10 year period. The greenhouse gases produced by the railways in both Denmark and Norway have increased by 9.5% between 2006 and 2015.

Although it does not look positive that only two of the countries have managed to reduce their greenhouse gas emissions from rail in this ten year period, this does not take into account how much the railways are being used.

Rather than the absolute quantity of greenhouse gas emissions produced, more insight can be gained from considering the specific emissions. Specific emissions are greenhouse gas emissions produced per passenger kilometre or per tonne kilometre for freight. Unfortunately due to a limited and incomplete data sources publicly available that differentiate between the emissions from a passenger train and a freight train, in this analysis is centered on the specific emissions being measured per passenger kilometre, not considering the freight kilometres.



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 7 – Emissioni di gas serra per passeggeri chilometro percorsi dalla combustione di carburante di treni.

Figure 7 – Greenhouse gas emissions per passenger kilometre travelled from fuel combustion in trains.

non sono considerate in questi dati. Ciò significa che i paesi con una percentuale più elevata di servizi di treni elettrici sembreranno avere minori emissioni. I dati riguardanti i passeggeri chilometro percorsi erano il numero totale di passeggeri chilometro poiché vi erano solo dati limitati disponibili al pubblico, che separavano i passeggeri chilometro dai treni elettrici e diesel.

3.2.1. Confronto con autovetture

Sono state calcolate le emissioni per passeggero chilometro percorso sui sistemi ferroviari nei cinque paesi. Eurostat dispone di dati relativi alle emissioni medie di gas a effetto serra prodotte all'anno da auto nuove immatricolate in ciascun paese. Questi dati non erano disponibili per la Norvegia, quindi è stata utilizzata la media dell'Unione Europea. È stato quindi possibile calcolare l'occupazione minima richiesta di un'auto in ciascun paese se l'auto dovesse produrre un minor numero di gas a effetto serra per passeggero chilometro rispetto ai viaggi in treno.

La Tab. 1 mostra questi dati per il 2015. La Danimarca ha le più alte emissioni ferroviarie ma ha le emissioni più basse per auto, quindi sono necessarie solo 2,8 persone in un'auto per renderla tanto economica per l'ambiente quanto per le ferrovie. L'unico altro paese in cui è possibile che un'automobile di passeggeri produca meno emissioni per passeggero è il Regno Unito. In tutti e cinque i paesi in studio non sarebbe possibile raggiungere tale obiettivo in un'automobile standard di 5 passeggeri. Le ferrovie svedesi rilasciano una quantità di anidride carbonica così ridotta per chilometro passeggero che equivale a trasportare 34,7 passeggeri su un veicolo standard.

L'occupazione media di autovetture nell'Unione Europea è di circa 1,45 passeggeri per automobile [7]. I dati sopra mostrano che anche in Danimarca e nel Regno Unito, dove sarebbe possibile confrontare le emissioni ferroviarie

Fig. 6 shows the amount of CO₂e emitted from fuel combustion in railways per passenger kilometre travelled and is more indicative of how efficient each rail system is as it shows the consequence of transporting a passenger one kilometre. Specifically Fig. 6 shows that Sweden has always, by far, emitted the least amount of greenhouse gases per PKT, and has managed to steadily decrease this to an astonishing 3.6g CO₂e/PKT. The next fewest greenhouse gases per PKT are from Norway, but their emissions are still four times as great as Sweden's with 14.4g CO₂e/PKT. Norway has not seen much change in the amount of greenhouse gases emitted per PKT since 2006, it has remained reasonably constant in this period. Denmark, Finland and the United Kingdom began the 10-year period with relatively similar emission values. Denmark saw a negligible change in emissions per PKT, increasing slightly to 38.5g CO₂e/PKT – a value over 10 times greater than that of Sweden. The United Kingdom has steadily decreased the emissions per PKT each year to 28.7g CO₂e/PKT in 2015. Finland has seen the most dramatic decrease, falling almost to the levels of Norway at 16.6g CO₂e/PKT.

Fig. 7 shows the greenhouse gases produced from fuel combustion in trains. Electric trains do not combust any fuel inside the train, hence the indirect emissions from generating the electricity are unaccounted for in this data. This means that countries with a higher proportion of electric train services will appear to have fewer emissions. The data for the passenger kilometres travelled was the total number of passenger kilometres as there is only limited publicly available data, which separated the passenger kilometres from electric and diesel trains.

3.2.1. Comparison with passenger cars

The emissions per passenger kilometre travelled on the rail systems in the five countries have been calculated. Eurostat has data for the average greenhouse gas emissions from new cars registered in each country per year. This data was unavailable for Norway, so the European Union average was used. It was then possible to calculate the minimum required occupancy of a car in each country if the car was to produce fewer greenhouse gases per passenger kilometre than rail travel.

Tab. 1 shows this data for 2015. Denmark has the highest rail emissions but has the lowest car emissions, so only 2.8 people are needed in a car to make it as economical for the environment as the railways. The only other country where it is possible for a car of passengers to produce less emissions per passenger is the United Kingdom. In all of the five countries under study it would not be possible to achieve this in a standard 5 passenger car. The railways in Sweden release so

Tabella 1 – Table 1

Tabella che mostra i passeggeri necessari per vettura per avere emissioni specifiche tanto basse quanto per la ferrovia (2015)

Table to show the passengers needed per car to have specific emissions as low as on the railway (2015)

| Paese Country | Emissioni ferroviarie 2015 gCO ₂ e/PKT Rail emissions 2015 gCO ₂ e/PKT | Emissioni di auto nuove 2015 gCO ₂ e/km New car emissions 2015 gCO ₂ e/km | Viaggiatori per autovettura Passengers per car |
|-------------------------------|---|--|--|
| Danimarca Denmark | 38,5 | 106,2 | 2,8 |
| Finlandia Finland | 16,7 | 123,0 | 7,4 |
| Svezia Sweden | 3,6 | 126,3 | 34,7 |
| Regno Unito United Kingdom | 28,7 | 121,3 | 4,2 |
| Norvegia Norway | 14,4 | 119,5 (media UE) 119.5 (EU av.) | 8,3 |

rie con quelle delle automobili, occorrerebbe compiere notevoli sforzi per raggiungere quest'obiettivo. L'autovettura media dovrebbe aumentare la sua occupazione del 93% in Danimarca e del 190% nel Regno Unito [9]. L'aumento dei tassi di occupazione delle auto non è particolarmente facile poiché le persone spesso non desiderano raggiungere la stessa destinazione alla stessa ora e per lo stesso periodo di tempo. Ciò è particolarmente vero nella società moderna in cui le persone stanno diventando sempre più impegnate e non vorrebbero essere vincolate ai programmi degli altri.

L'obiettivo dell'Unione Europea per il 2015 era che il livello medio di emissioni per le nuove auto fosse di 130g CO₂e/km. Il valore effettivo raggiunto di 119,5 g CO₂e/ km era significativamente inferiore all'obiettivo. Il nuovo obiettivo per il 2020 è 95 g CO₂e/km, altrimenti verranno applicate penalità [4], [5], [6].

La Tab. 2 mostra il nuovo numero di passeggeri per auto in una tabella, che sarebbe equivalente alla ferrovia se si dovessero raggiungere gli obiettivi di emissione dei nuovi veicoli. Vi sono ancora solo due paesi, la Danimarca e il Regno Unito, per i quali sarebbe possibile uguagliare le emissioni prodotte dalla ferrovia riempiendo un'auto standard a cinque posti. Ciò suggerirebbe che la soluzione al trasporto verde non è quella di ridurre le emissioni delle auto, ma di incoraggiare l'uso delle ferrovie. Questo perché anche dopo il raggiungimento degli obiettivi di emissioni delle auto per il 2020, sarebbe ancora impossibile far corrispondere le emissioni per ferrovia in tre dei cinque paesi studiati.

3.3. KPI 3 - Veicoli elettrici

Una misura efficace per determinare in che modo è stata implementata la ferrovia elettrica è quella di considera-

little carbon dioxide per passenger kilometre that it is equivalent to transporting 34.7 passengers in one standard car.

The average passenger car occupancy in the European Union is approximately 1.45 passengers per car [7]. The data above shows that even in Denmark and the United Kingdom where it would be possible to match rail emissions with cars, it would require a significant effort to be put in to achieve this. The average passenger car would have to increase its occupancy by 93% in Denmark and 190% in the United Kingdom [9]. Increasing car occupancy rates is not particularly easy as people often do not wish to go to the same destination at the same time and for the same length of time. This is especially true in modern society where people are becoming increasingly busy and would not like to be bound to other people schedules.

The European Union target for 2015 was for the average emissions level for new cars to be 130g CO₂e/km. The actual achieved value of 119.5g CO₂e/km was significantly lower than the target. The new target for 2020 is 95g CO₂e/km, otherwise penalty payments will apply [4], [5], [6].

Table 2 shows the new number of passengers per car in a table, which would be equivalent to the rail if the new vehicle emissions targets are to be met. There are still only two countries, Denmark and the United Kingdom, for which it would be possible to match the emissions produced by rail by filling a standard five seat car. This would suggest that the solution to green transport is not to bring down car emissions, but to encourage use of the railways. This is because even after if the car emissions targets for 2020 are met, it would still be impossible to match the emissions for rail in three out of the five countries being studied.

3.3. KPI 3 – Electric vehicles

An effective measure of determining how widely electric rail has been implemented is to consider the length of electrified track in each country. Fig. 8 shows the percentage of the length of rail track in each country which has been electrified using data sourced from Eurostat. There is no data available for Denmark beyond 2008 and for the United Kingdom in 2011. Fig. 8 shows exactly what was predicted: Sweden has the most electrified track, followed by Norway, Finland, the United Kingdom then Denmark. This is exactly the reverse order as they appear in Fig. 7, showing that they appeared to have very low emissions due to the large proportion of rail services being powered by electricity instead of diesel.

Electric trains are often considered to be less polluting as they are not burning fuel inside the train. However there are indirect emissions produced from the generation of the electricity which will power the trains. This means that the methods used by each country to

Tabella 2 – Table 2

Tabella che mostra i passeggeri necessari per vettura per avere emissioni specifiche tanto basse quanto per la ferrovia per un'auto nuova nel 2020
Table to show the passengers needed per car to have specific emissions as low as on the railway for a new car in 2020

| Paese Country | Emissioni ferroviarie 2015 gCO ₂ e/PKT Rail emissions 2015 gCO ₂ e/PKT | Obiettivo 2020 emissioni auto nuove gCO ₂ e/km New car emissions 2020 target gCO ₂ e/km | Viaggiatori per autovettura Passengers per car |
|-------------------------------|---|---|--|
| Danimarca Denmark | 38,5 | 95,0 | 2,5 |
| Finlandia Finland | 16,7 | 95,0 | 5,7 |
| Svezia Sweden | 3,6 | 95,0 | 26,1 |
| Regno Unito United Kingdom | 28,7 | 95,0 | 3,3 |
| Norvegia Norway | 14,4 | 95,0 | 6,6 |

re la lunghezza del tracciato elettrificato in ciascun paese. La Fig. 8 mostra la percentuale della lunghezza del tracciato ferroviario in ciascun paese che è stata elettrificata utilizzando i dati provenienti da Eurostat. Non vi sono dati disponibili per la Danimarca oltre il 2008 e per il Regno Unito nel 2011. La Fig. 8 mostra esattamente ciò che era stato previsto: la Svezia ha il tracciato più elettrificato, seguita da Norvegia, Finlandia, Regno Unito e Danimarca. Questo è esattamente l'ordine inverso come appaiono nella Fig. 7, a dimostrazione del fatto che sembravano avere emissioni molto basse a causa della grande percentuale di servizi ferroviari alimentati da elettricità anziché diesel.

I treni elettrici sono spesso considerati meno inquinanti poiché non bruciano carburante all'interno del treno. Tuttavia, vi sono emissioni indirette prodotte dalla generazione di elettricità che alimenterà i treni. Ciò significa che i metodi utilizzati da ciascun paese per generare elettricità avranno un ruolo molto importante nel determinare le emissioni dei treni elettrici.

I fattori di emissione specifici dell'elettricità sono stati calcolati utilizzando i dati dell'Agenzia Internazionale dell'Energia [2]. Le emissioni di anidride carbonica per chilowattora di elettricità consumata combinano le emissioni della generazione di elettricità con le emissioni di trasmissione e distribuzione dalla rete. Questi dati sono mostrati nella Fig. 9.

In particolare la Fig. 9 mostra che i gas serra prodotti dal consumo di elettricità in Norvegia e Svezia sono estremamente bassi, seguiti da Finlandia e Danimarca. La produzione di elettricità del Regno Unito è ad alta intensità di

generate their electricity will play a very big role in determining the emissions from electric trains.

The electricity specific emission factors have been calculated using data from the International Energy Agency [2]. The carbon dioxide emissions per kilowatt hour of electricity consumed combines the emissions from the generation of the electricity with the transmission and distribution emissions from the grid. This data is shown in Fig. 9.

Specifically Fig. 9 shows that the greenhouse gases produced from the consumption of electricity in Norway and Sweden is extremely low, followed by Finland then Denmark. The United Kingdom's electricity generation is very carbon intensive; releasing 137 times the amount of carbon dioxide into the atmosphere per kWh than Norway, whose electricity grid is almost carbon neutral. This is because the majority (95%) of Norway's electricity supply is from hydro power which is considered to be carbon neutral.

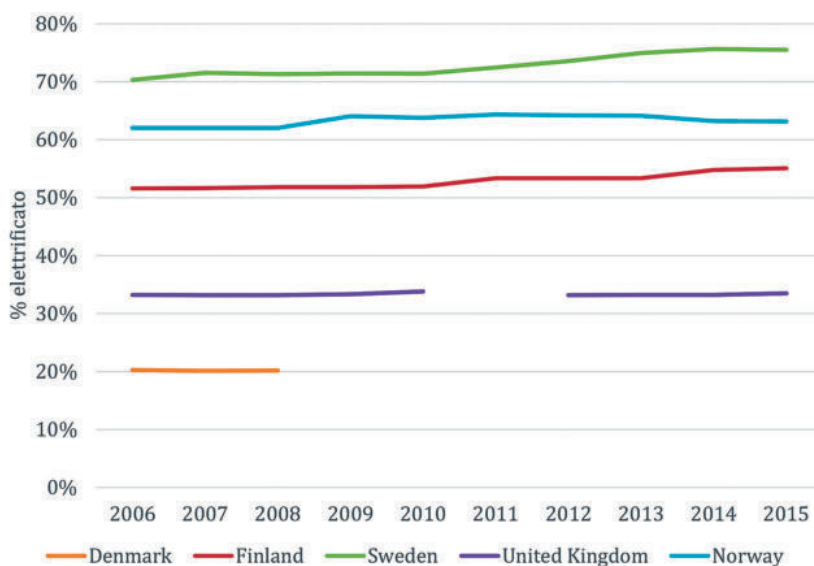
With Norway and Sweden having both the highest proportion of electrified track and the lowest carbon emissions from electricity generation, they are able to run rail networks, which have a very low carbon intensity.

A study has been conducted into the number of kilowatt hours required to power the trains in Scandinavia per passenger kilometre [11]. A load factor was needed to account for how full or empty the trains were, as fuller trains will use less energy per passenger kilometre than empty ones. The load factor is calculated as a ratio between the number of passenger km and the maximum offered seat km. It was found that the load factor was higher on long distance trains and lower on shorter distance regional trains.

The long distance electric trains typically consumed 0.079kWh/PKT at a load factor of 60%. The train with the lowest load factor was a fast regional train; with a load factor of 20% the electrical energy consumed was 0.168kWh/PKT. Assuming that the electric trains in all of the countries are of a similar efficiency to those investigated, the emissions per passenger kilometre can be estimated using the electricity emission factors for each country.

It is apparent from the data in Tab. 3 that both the load factor and the electricity emissions factor have very significant impacts on the specific emissions for electric trains. The low electricity emission factor in Norway means that less than half a gram of carbon dioxide is released per passenger kilometre regardless whether the load factor is high or low.

Electric cars are becoming increasingly popular and as with electric trains, greenhouse gases are not pro-



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 8 – Percentuale di tracciato elettrificato in ciascun paese (non sono disponibili dati per la Danimarca dopo il 2008 e per il Regno Unito nel 2011).

Figure 8 – Percentage of electrified rail track in each country (no data is available for Denmark after 2008 and for the United Kingdom in 2011).

POLITICA E ECONOMIA

carbonio; rilasciando 137 volte la quantità di anidride carbonica nell'atmosfera per kWh rispetto alla Norvegia, la cui rete elettrica è quasi a zero emissioni di carbonio. Questo perché la maggior parte (95%) della fornitura di energia elettrica della Norvegia proviene da energia idroelettrica che è considerata neutra dal punto di vista del carbonio.

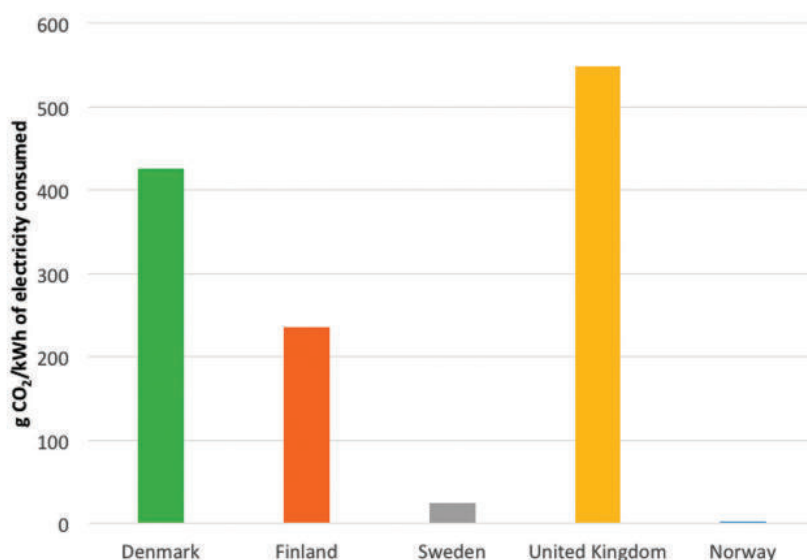
Con la Norvegia e la Svezia che hanno sia la più alta percentuale di binari elettrificati sia le più basse emissioni di carbonio derivanti dalla generazione di elettricità, sono in grado di gestire reti ferroviarie con un'intensità di carbonio molto bassa.

È stato condotto uno studio sul numero di chilowattora richiesti per alimentare i treni in Scandinavia per passeggero chilometro [11]. Era necessario un fattore di carico per tenere conto di quanto fossero pieni o vuoti i treni, poiché i treni più pieni utilizzeranno meno energia per passeggero chilometro rispetto a quelli vuoti. Il fattore di carico è calcolato come rapporto tra il numero di passeggeri km e i posti km massimi offerti. È stato riscontrato che il fattore di carico era maggiore sui treni a lunga percorrenza e inferiore sui treni regionali a breve percorrenza.

I treni elettrici a lunga percorrenza consumavano in genere 0,079 kWh/PKT con un fattore di carico del 60%. Il treno con il fattore di carico più basso era un treno regionale veloce; con un fattore di carico del 20% l'energia elettrica consumata era di 0,168 kWh/PKT. Supponendo che i treni elettrici in tutti i paesi abbiano un'efficienza simile a quelli studiati, le emissioni per passeggero chilometro possono essere stimate utilizzando i fattori di emissione dell'elettricità per ciascun paese.

Dai dati della Tab. 3 risulta che sia il fattore di carico che quello delle emissioni per la produzione di elettricità hanno un impatto molto significativo sulle emissioni specifiche dei treni elettrici. Il basso fattore di emissione per la produzione di elettricità in Norvegia significa che viene rilasciato meno di mezzo grammo di anidride carbonica per passeggero chilometro, indipendentemente dal fatto che il fattore di carico sia alto o basso.

Le auto elettriche stanno diventando sempre più popolari e, come con i



(Fonte - Source: Ecometrica [2])

Figura 9 – Emissioni di biossido di carbonio dal consumo di elettricità (2011) (il valore comprende le emissioni prodotte dall'elettricità e le perdite di trasmissione e distribuzione).
Figure 9 – Carbon dioxide emissions from the consumption of electricity (2011) (value includes the emissions from electricity generation as well as transmission and distribution losses).

duced in the vehicle itself, but indirect emissions are produced from electricity generation.

The top selling battery electric vehicle (BEV) in the United Kingdom is the Nissan Leaf, with 3115 of the Tekna 30kWh models registered in 2017 [1]. This model claims to have an electric energy consumption of 6.6km/kWh – equivalent to 0.15kWh/km [15]. Multiplying this energy consumption will indicate the greenhouse gases produced

Tabella 3 – Table 3

Emissioni specifiche di gas a effetto serra dei treni elettrici con fattori di carico elevati e bassi
Specific greenhouse gas emissions from electric trains with high and low load factors

| Emissioni di gas a effetto serra dei treni elettrici (gCO ₂ /PKT) Electric train GHG emissions (gCO ₂ /PKT) | | |
|--|---|--|
| Paese Country | Fattore di carico elevato (60%) High load factor (60%) | Fattore di carico basso (20%) Low load factor (20%) |
| Danimarca Denmark | 33,59 | 71,44 |
| Finlandia Finland | 18,64 | 39,63 |
| Svezia Sweden | 1,95 | 4,15 |
| Regno Unito United Kingdom | 43,32 | 92,13 |
| Norvegia Norway | 0,19 | 0,41 |

Tabella 4 – Table 4

Emissioni specifiche per un veicolo elettrico a batteria in diversi paesi
Specific emissions for a battery electric vehicle in different countries

| Emissioni specifiche BEV per paese (g CO ₂ e/PKT) Country BEV specific emissions (g CO ₂ e/PKT) | | |
|--|---|---|
| Paese Country | Fattore di carico elevato (60%) High load factor(60%) | Fattore di carico basso (20%) Low load factor (20%) |
| Danimarca Denmark | 33,59 | 71,44 |
| Finlandia Finland | 18,64 | 39,63 |
| Svezia Sweden | 1,95 | 4,15 |
| Regno Unito United Kingdom | 43,32 | 92,13 |
| Norvegia Norway | 0,19 | 0,41 |

treni elettrici, i gas serra non vengono prodotti nel veicolo stesso, ma le emissioni indirette sono prodotte dalla generazione di elettricità.

Il veicolo elettrico a batteria (BEV) più venduto nel Regno Unito è il Nissan Leaf, con 3115 dei modelli Tekna 30kWh immatricolati nel 2017 [1]. Questo modello afferma di avere un consumo di energia elettrica di 6,6 km/kWh - equivalente a 0,15 kWh/km [15]. Moltiplicando questo consumo di energia si indicheranno i gas serra prodotti per chilometro di veicolo. Questo può quindi essere diviso per la media dell'Unione Europea per occupazione di autovetture di 1,45 passeggeri per veicolo. La Tab. 4 riporta le emissioni specifiche del veicolo elettrico a batteria in ciascun paese.

3.3.1. Confronto tra trasporto stradale e ferroviario

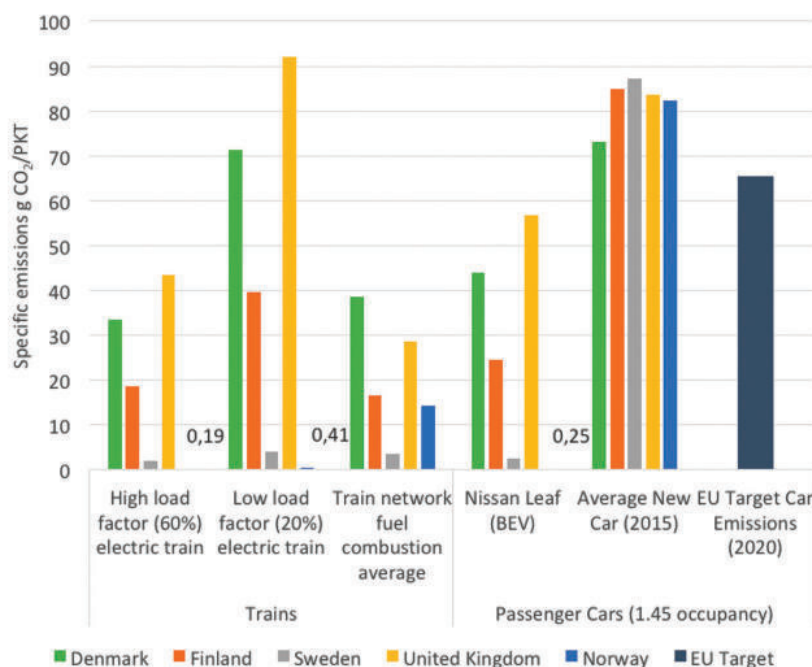
Tutte le emissioni specifiche calcolate possono ora essere tracciate per ciascun paese. Ciò è mostrato nella Fig. 10. Se si considera la direzione in cui il trasporto dovrebbe andare in futuro, sembra che Svezia, Norvegia e Finlandia debbano sicuramente scegliere la propulsione elettrica. Le emissioni di gas serra della Svezia e della Norvegia dai veicoli elettrici sono notevolmente basse. Nonostante ciò, il veicolo nuovo medio immatricolato in Svezia nel 2015 ha registrato le emissioni di gas serra più elevate per chilometro. Ciò suggerisce che

per vehicle kilometre. This can then be divided by the European Union average for passenger car occupancy of 1.45 passengers per vehicle. The specific emissions from the battery electric vehicle in each country are shown in Tab. 4.

3.3.1. Comparison between road and rail transport

All of the specific emissions calculated can now be plotted for each country. This is shown in Fig. 10. When considering the direction transport should go in the future, it appears that Sweden, Norway and Finland should definitely choose electric propulsion. Sweden and Norway's greenhouse gas emissions from electric vehicles are remarkably low. Despite this, the average

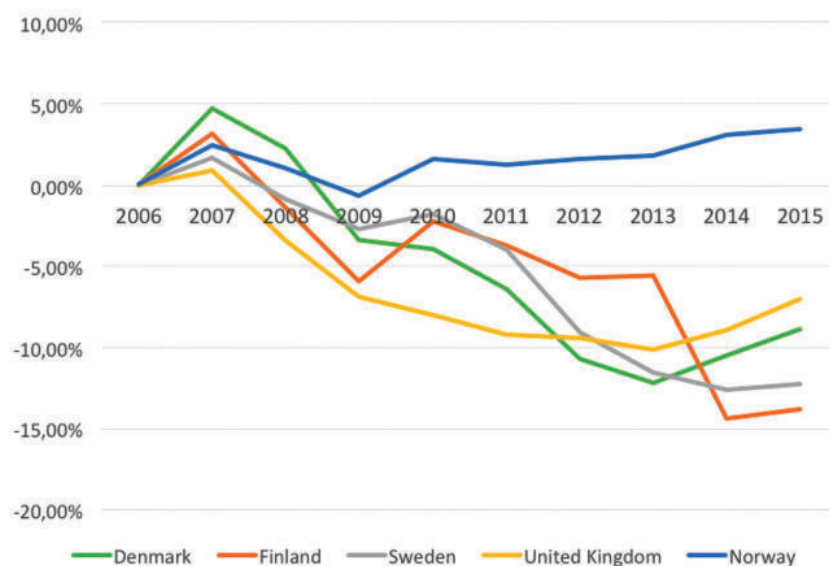
new vehicle registered in Sweden in 2015 had the highest greenhouse gas emissions per kilometre. This suggests that there are not many people in Sweden choosing to purchase alternative fuel vehicles such as plug in hybrid electric vehicles (PHEV) and battery electric vehicles (BEV) over petrol and diesel powered cars.



(Fonte - Source: Ecometrica [2])

Figura 10 – Un confronto delle emissioni specifiche di gas a effetto serra di diversi veicoli stradali e ferroviari.

Figure 10 – A comparison of the specific greenhouse gas emissions from different road and rail vehicles.



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 11 – Variazione percentuale dei gas serra annuali prodotti dalla combustione di carburante dei veicoli stradali rispetto ai livelli del 2006.

Figure 11 - Percentage change in annual greenhouse gases produced from fuel combustion in road vehicles compared to 2006 levels.

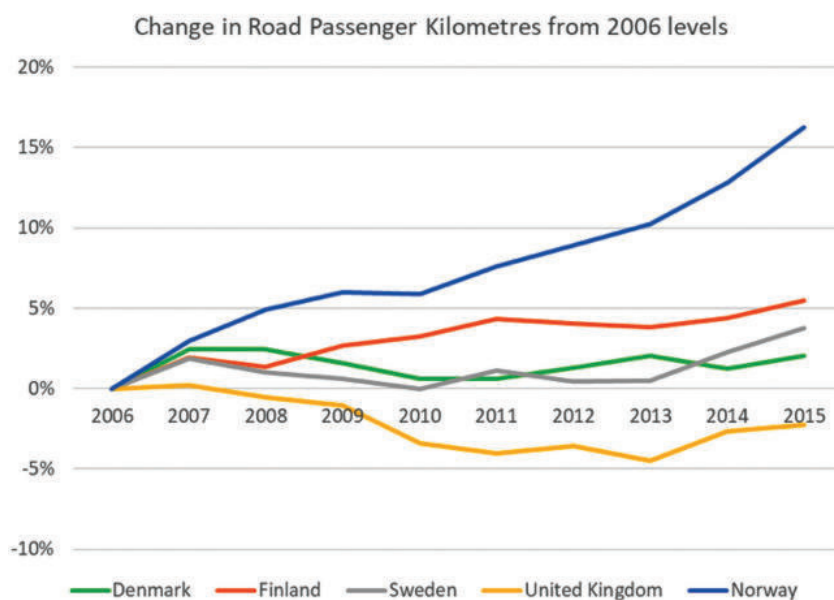
non ci sono molte persone in Svezia che scelgono di acquistare veicoli a carburante alternativo come veicoli elettrici ibridi plug-in (PHEV) e veicoli elettrici a batteria (BEV) anziché auto a benzina e diesel.

La Fig. 11 mostra la variazione dei gas serra totali annui emessi dalla combustione di carburante dei veicoli stradali. Vi è stata una forte riduzione dei gas a effetto serra emessi nel 2008 e nel 2009. Le ragioni di questa drammatica riduzione dei gas a effetto serra causati dal trasporto su strada sono probabilmente molto simili a quelle proposte per il trasporto ferroviario. Un calo dell'occupazione e degli scambi avrebbe comportato una diminuzione rispettivamente dei pendolari e delle merci spedite. Durante il 2008 anche il prezzo del petrolio è salito molto rapidamente a un massimo storico, il che significa che il prezzo della benzina e del diesel è aumentato a un ritmo simile. Durante questo periodo molte persone avrebbero probabilmente dovuto essere più consapevoli di quanto stavano usando le loro auto e possibilmente ridurre il loro utilizzo per viaggi meno necessari.

La Fig. 12 mostra che i passeggeri chilometro su strada sono diminuiti anche nel 2008, confermando che le

Fig. 11 shows the change in total annual greenhouse gases emitted from fuel combustion in road vehicles. There was a huge decrease in the greenhouse gases emitted in 2008 and 2009. The reasons for this dramatic decrease in greenhouse gases from road transport are likely to be very similar to those proposed for rail. A fall in employment and trade would have led to a decrease in commuters and goods shipped respectively. During 2008 the price of oil also rose very rapidly to an all-time high, this meant the price of petrol and diesel increased at a similar rate. Many people during this period would have likely had to be more mindful of how much they were using their cars and possibly reduce their car usage for less necessary journeys.

Fig. 12 shows the road passenger kilometres decreased in 2008 as well, confirming that people did stop using their cars as much. However the passenger kilometres did not decrease as dramatically as the greenhouse gases. A possible reason for this could be an increase in the number of people car sharing. In order to cut the cost of their daily commute people may have shared car journeys with friends



(Fonte - Source: Eurostat [8])

Figura 12 – Variazione percentuale dei passeggeri chilometro su strada rispetto ai livelli del 2006.

Figure 12 - Percentage change in road passenger kilometres from 2006 levels.

persone hanno diminuito l'uso delle loro auto. Tuttavia, i passeggeri chilometro non sono diminuiti in modo così drammatico quanto i gas serra. Una ragione possibile di ciò potrebbe essere un aumento del numero di persone che condividono l'auto. Al fine di ridurre il costo del loro tragitto giornaliero, le persone possono aver condiviso viaggi in auto con amici e colleghi. Ciò non ridurrebbe il numero di passeggeri chilometro percorsi poiché il viaggio è stato comunque effettuato, ma ridurrebbe le emissioni di gas a effetto serra poiché meno macchine sarebbero sulle strade.

Le autovetture sono state a lungo il mezzo di trasporto preferito dalle persone per molte ragioni. Alcuni vantaggi personali di possedere un'auto includono che le auto possono essere guidate "porta a porta". Ciò significa che un viaggio può essere completato dall'essere parcheggiato fuori dalla propria casa all'essere parcheggiato nella destinazione prescelta senza il tempo di viaggio o lo sforzo richiesto per arrivare da e verso le stazioni ferroviarie. Le auto non fanno affidamento su un programma, il che significa che il conducente è in grado di iniziare il viaggio in un momento a lui adatto. Se un conducente parte leggermente in ritardo, probabilmente arriverà a destinazione solo leggermente in ritardo, tuttavia se si perde un treno, l'attesa potrebbe essere molto più lunga fino al prossimo servizio. Le auto possono essere più veloci della ferrovia per molti viaggi, in particolare quelli rurali che possono avere servizi ferroviari non frequenti. I vantaggi sociali della proprietà di un'auto possono essere che le persone possono scegliere di vivere più lontano dalle città piuttosto che vicino al centro dove le case sono tradizionalmente più richieste. Inoltre, la salute di una società può giovare poiché le persone possono raggiungere più facilmente i parenti malati e gli ospedali con un'auto. Le auto hanno anche i loro svantaggi rispetto ai treni. Molti viaggi, in particolare i viaggi pendolari nelle città, possono essere molto più veloci in treno perché non c'è traffico in cui attendere. Quando il treno arriva alla stazione, di solito è direttamente nel centro della città con attività commerciali, servizi e attività ricreative nelle vicinanze. Se un automobilista desidera essere nel centro della città, probabilmente dovrà attendere a lungo nel traffico, poi provare a trovare un parcheggio che può essere spesso costoso, dato il volume delle auto e la mancanza di spazio in città. I pendolari possono anche essere produttivi durante il viaggio in treno facendo lavoro sul proprio telefono cellulare e laptop o leggendo giornali o libri. Ciò può consentire alle persone di lasciare il lavoro leggermente prima di quanto farebbero altrimenti poiché potrebbero completare parte del loro lavoro mentre un automobilista è improduttivo in attesa nel traffico. Ci sono molti vantaggi per la società nel trasferire le persone dalle loro automobili alle ferrovie. Un numero maggiore di passeggeri che utilizzano il trasporto ferroviario rispetto a quello dei passeggeri su strada ridurrebbe l'inquinamento stradale poiché le emissioni ferroviarie non sono rilasciate immediatamente vicino a pedoni e ciclisti, ma lontano dalle persone o nelle centrali elettriche per i treni elettrici. Sebbene le auto elettriche non

and colleagues. This would not decrease the number of passenger kilometres travelled as the journey was still made, but it would decrease the greenhouse gas emissions as less cars would be on the roads.

Passenger cars have long been people's favourite mode of transport for many reasons. Some personal advantages of owning a car include that cars can be driven 'door-to-door'. This means a journey can be completed from being parked outside their house to being parked at their chosen destination with no travel time or effort required to get to and from train stations. Cars do not rely on a schedule, meaning the driver is able to begin their journey at a time that suits them. If a driver is slightly late setting off, they will likely arrive at their destination only slightly late, however if a train is missed it could be a much longer wait until the next service. Cars can be quicker than rail for many journeys, particularly rural journeys which may have very infrequent rail services. Societal benefits of car ownership can be that people can choose to live further outside of the cities rather than near the centre where houses are traditionally more in demand. In addition, the health of a society can benefit as people can reach ill relatives and hospitals more easily with a car. Cars also have their disadvantages compared to trains. Many journeys, especially commuter journeys into the cities, can be much quicker by rail as there is no traffic to wait in. When the train arrives at the station it is usually directly in the city centre with businesses, services and leisure activities all nearby. If a car driver wishes to be in the city centre they will likely have to wait in traffic for a long time then try and find a parking space which can often be expensive given the volume of cars and lack of space in the city. Commuters may also be productive during their journey on the train by doing work on their mobile phone and laptop, or by reading newspapers or books. This may allow people to leave work slightly earlier than they would otherwise as they can complete some of their work while a car driver is unproductive waiting in traffic. There are a great number of societal benefits of shifting people from their cars to the railways. More rail passengers over road passengers would decrease roadside pollution as the rail emissions are not released immediately next to pedestrians and cyclists, but away from people or at power stations for electric trains. Although electric cars emit no exhaust emissions, it has been found that non-exhaust sources such as brake wear and tyre wear contribute just as much to the roadside particulate emissions [19]. If more cars are encouraged to drive into the cities, the infrastructure must be developed to accommodate for the increased vehicle traffic. This could include the widening of roads and allowing cars to drive on previously pedestrianised areas [13]. This makes it more difficult for pedestrians and cyclists to navigate through the city, reducing accessibility and mobility especially to those using wheelchairs and parents with pushchairs. In addition, the increased number of cars entering the city would require parking. Land close to the centre of a city is usually at a premium so there would not be much to allocate to creat-

emettano gas di scarico, è stato riscontrato che fonti non di scarico come l'usura dei freni e l'usura dei pneumatici contribuiscono altrettanto alle emissioni di particolato lungo la strada [19]. Se si incoraggiano più auto a guidare nelle città, è necessario sviluppare l'infrastruttura per far fronte all'aumento del traffico automobilistico. Ciò potrebbe includere l'ampliamento delle strade e consentire alle auto di circolare su aree prima pedonali [13]. Ciò rende più difficile per i pedoni e i ciclisti circolare nella città, riducendo l'accessibilità e la mobilità soprattutto per coloro che utilizzano sedie a rotelle e genitori con passeggini. Inoltre, l'aumento del numero di auto che entrano in città richiederebbe parcheggi. La terra vicino al centro di una città di solito è scarsa, quindi non ci sarebbe molto da assegnare alla creazione di parcheggi. I parcheggi sono molto inefficienti in termini di spazio e potrebbero ridurre la quantità di spazi ricreativi verdi o nuove case, di cui le città potrebbero beneficiare.

4. Previsione delle Emissioni dal Trasporto Ferroviario Passeggeri

L'Unione Europea ha fissato un obiettivo a lungo termine per ridurre le emissioni di gas serra dell'80% entro il 2050 rispetto alla linea di riferimento del 1990. Il quadro 2030 per il clima e l'energia [5] fissa un obiettivo intermedio di riduzione delle emissioni di gas serra entro il 2030 del 40% rispetto ai livelli del 1990. Utilizzando i dati per il periodo di dieci anni tra il 2006 e il 2015, è possibile fare una previsione per ogni paese per prevedere se sono sulla buona strada per raggiungere gli obiettivi di emissione dell'Unione Europea. La previsione utilizza le emissioni ferroviarie specifiche, le emissioni totali di gas a effetto serra prodotte dalla combustione del carburante nei treni divise per passeggeri chilometro annuali [14], per tenere conto di un aumento del trasferimento modale alla ferrovia. Considerando le emissioni specifiche, è possibile monitorare l'efficienza dei treni e analizzare l'andamento.

È stato utilizzato un pacchetto standard per computer per tracciare i dati per la finestra di dieci anni che è stata studiata. Da questi dati sono state prodotte ed estrapolate due linee di tendenza fino all'anno 2050. La prima linea di tendenza è una regressione lineare e la seconda è una regressione esponenziale. Gli obiettivi per il 2030 e il 2050 sono illustrati con linee orizzontali nelle Figg. 13÷17. Gli obiettivi per la Norvegia non sono disponibili.

Le previsioni prevedono che la Finlandia, la Svezia e il Regno Unito raggiungeranno gli obiettivi di emissione se dovessero seguire il modello lineare

ing car parks. Car parks are very space inefficient and could decrease the amount green leisure spaces or new houses, which the cities could benefit from.

4. Forecasting the Emissions from Passenger Rail Transport

The European Union have set a long term target of reducing greenhouse gas emissions by 80% by 2050 compared to the 1990 baseline. The 2030 climate and energy framework [5] sets an intermediate target of reducing greenhouse gas emissions by 40% from 1990 levels by 2030. Using the data for the ten year period between 2006 and 2015, a forecast can be made for each country to predict if they are on track to meet the European Union emissions targets. The forecast uses the specific rail emissions, the total greenhouse gas emissions from fuel combustion in trains divided by the annual passenger kilometres [14], to account for an increase in the modal shift to rail. By considering the specific emissions, the efficiency of the trains can be monitored and the trend can be analysed.

A standard computer package has been used to plot the data for the ten year window which has been studied. From this data, two trend lines have been produced and extrapolated to the year 2050. The first trend line is a linear regression and the second is an exponential regression. The targets for 2030 and 2050 have been displayed on Figs. 13÷17 with horizontal lines. Targets for Norway unavailable.

The forecasts predict that Finland, Sweden and the United Kingdom will meet the emissions targets if they were to follow either the linear or exponential model. Fin-

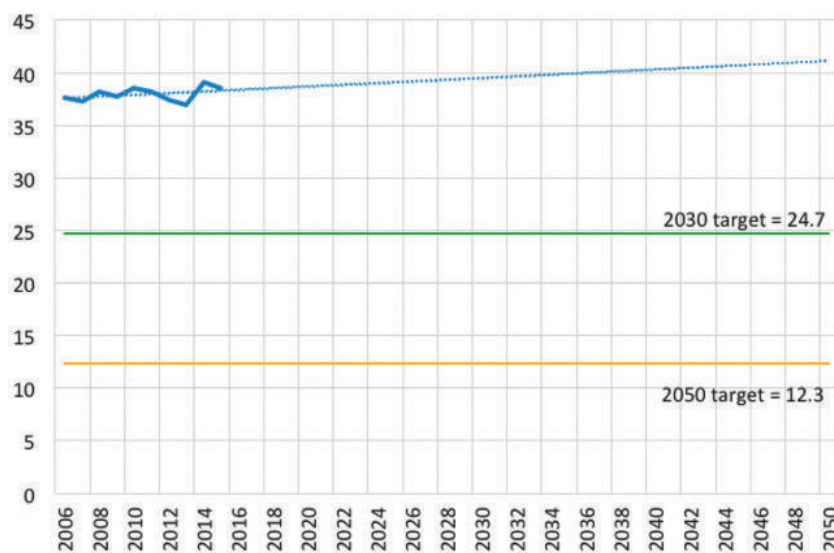


Figura 13 – Previsioni lineari ed esponenziali per le emissioni specifiche di gas a effetto serra per passeggero chilometro derivanti dalla combustione di carburante dei treni in Danimarca.

Figure 13 – Linear and exponential forecast for the specific greenhouse gas emissions per passenger kilometre from fuel combustion in trains in Denmark.

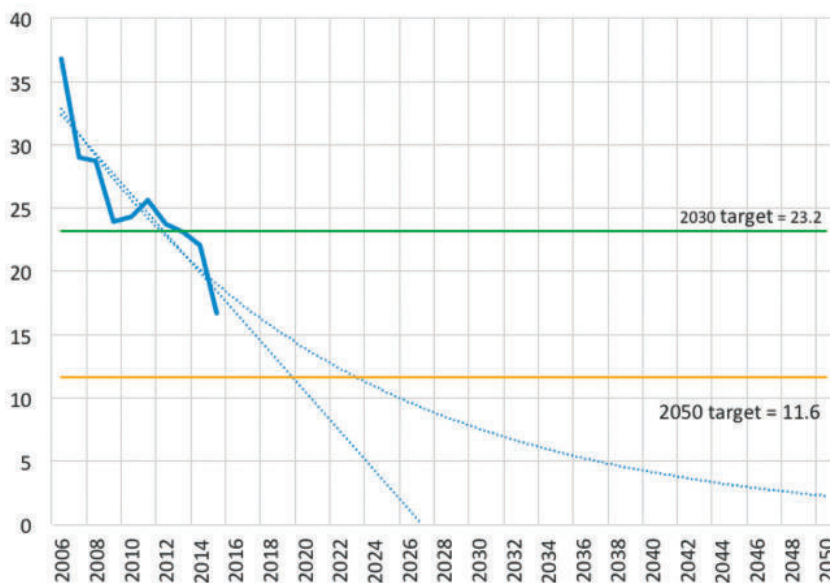


Figura 14 – Previsioni lineari ed esponenziali per le emissioni specifiche di gas a effetto serra per passeggero chilometro derivanti dalla combustione di carburante dei treni in Finlandia.
Figure 14 – Linear and exponential forecast for the specific greenhouse gas emissions per passenger kilometre from fuel combustion in trains in Finland.

o esponenziale. La Finlandia e la Svezia hanno già superato l'obiettivo del 2030 e sono molto vicine al raggiungimento dell'obiettivo del 2050. Ciò è probabilmente dovuto in gran parte all'aumento dell'elettrificazione ferroviaria in questi paesi. Se il Regno Unito dovesse seguire il modello esponenziale, raggiungerebbe gli obiettivi del 2030 e 2050 appena in tempo (Tab. 5).

Le emissioni specifiche in Danimarca hanno seguito una tendenza al rialzo nel periodo di dieci anni per il quale sono stati analizzati i dati. Ciò significava che la previsione prevedeva che gli obiettivi non sarebbero mai stati raggiunti poiché le emissioni continuavano a salire. Questa non è ovviamente una previsione molto probabile poiché nuove politiche e miglioramenti delle infrastrutture e del materiale rotabile vedranno alla fine diminuire le emissioni specifiche. Non sono stati trovati dati per i passeggeri chilometro percorsi in Norvegia nel 1990, pertanto non è stato possibile calcolare i valori per gli obiettivi di emissione. I dati riguardanti il periodo di dieci anni per la Norvegia hanno oscillato in modo rilevante, pertanto le linee di regressione potrebbero non essere molto precise, tuttavia indicano una tendenza negativa. Nel 2050, le emissioni specifiche di gas a effetto serra saranno diminuite del 66,4% rispetto ai livelli del 2006 se

land and Sweden have already surpassed the 2030 target and are very close to reaching the 2050 target. This is likely largely to do with increased railway electrification in these countries. If the United Kingdom was to follow the exponential model, it would reach the 2030 and 2050 targets just in time (Tab. 5).

The specific emissions in Denmark have followed an upwards trend in the ten year period for which the data was analysed. This meant that the forecast predicted that the targets would never be reached as the emissions just continued to rise. This is obviously not a very likely prediction as new policies and improvements to the infrastructure and rolling stock will eventually see the specific emissions decrease. No data could be found for the passenger kilometres travelled in Norway in 1990, therefore the values for the emissions targets could not be calculated. The data for the ten year period for Norway fluctuated significantly therefore the regressions lines may not be very accurate, however they do indicate a negative trend. In 2050, the specific greenhouse gas emissions will have fallen by 66.4% from 2006 levels if they follow the linear trend. If an exponential trend is followed, there would have been a 50.5% decrease upon 2006 specific greenhouse gas emissions. This indi-

fore the regressions lines may not be very accurate, however they do indicate a negative trend. In 2050, the specific greenhouse gas emissions will have fallen by 66.4% from 2006 levels if they follow the linear trend. If an exponential trend is followed, there would have been a 50.5% decrease upon 2006 specific greenhouse gas emissions. This indi-

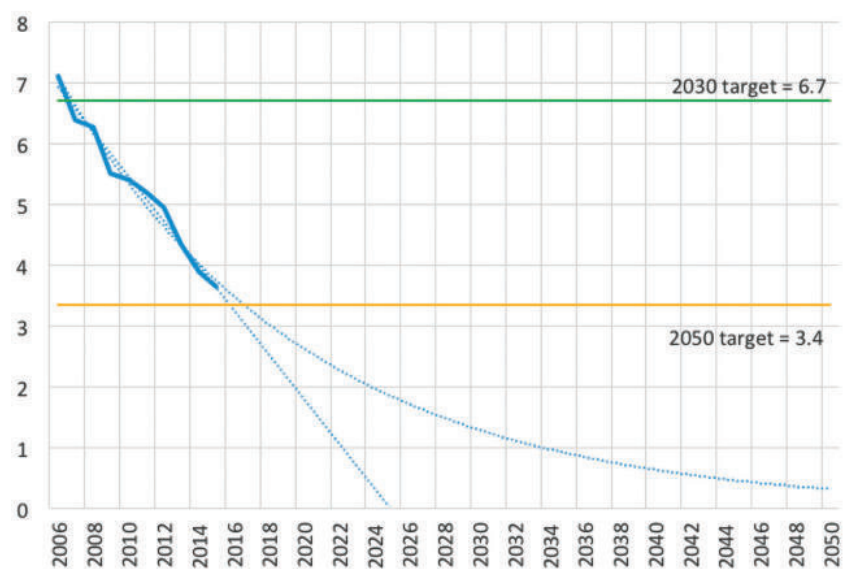


Figura 15 – Previsioni lineari ed esponenziali per le emissioni specifiche di gas a effetto serra per passeggero chilometro derivanti dalla combustione di carburante dei treni in Svezia.
Figure 15 – Linear and exponential forecast for the specific greenhouse gas emissions per passenger kilometre from fuel combustion in trains in Sweden.

seguiranno la tendenza lineare. Se si seguisse una tendenza esponenziale, si verificherebbe un calo del 50,5% rispetto alle emissioni specifiche di gas serra del 2006. Ciò indica che sarebbe molto probabile che le emissioni raggiungessero gli stessi obiettivi degli altri paesi se fossero confrontate con i dati del 1990. Questo perché le emissioni specifiche del 1990 erano significativamente più elevate delle emissioni del 2006, quindi la diminuzione percentuale rispetto al 1990 sarebbe molto più elevata rispetto al 2006.

Come discusso, per fornire queste previsioni, sono stati utilizzati due tipi di regressione: regressione lineare e regressione esponenziale. Non è noto quale, se del caso, modello probabilmente seguiranno le emissioni dei paesi. Una tendenza lineare significherebbe che i paesi dovrebbero continuare a ridurre le loro emissioni specifiche di un importo costante ogni anno. Ciò sarebbe molto difficile, soprattutto dopo alcuni anni in cui sono già riusciti a ridurre significativamente le loro emissioni. Ridurre le emissioni è più facile quando le emissioni sono più basse poiché vi è più spazio per migliorare le inefficienze e migliorare la rete. Un modello esponenziale risolve questo problema poiché la regressione si basa sul fatto che un paese riduce le proprie emissioni di una percentuale fissa ogni anno. Ciò significa che, man mano che le loro emissioni diminuiscono, diminuisce anche la quantità di cui devono diminuirle. Una limitazione con il modello esponenziale è che col passare del tempo, il calo delle emissioni potrebbe non rallentare poiché i progressi tecnologici renderanno più semplice ed economico per i paesi ridurre le emissioni. I valori reali per le emissioni specifiche seguiranno probabilmente una combinazione dei due modelli, con le emissioni che diminuiranno a un ritmo lineare rapido quando saranno implementati nuovi grandi sviluppi e tecnologie, ma seguiranno un modello esponenziale più lento man mano che le inefficienze operative quotidiane sono migliorate.

Se le emissioni specifiche di gas a effetto serra in Danimarca iniziano a diminuire, è possibile calcolare la quantità necessaria per ridurre le emissioni per raggiungere l'obiettivo

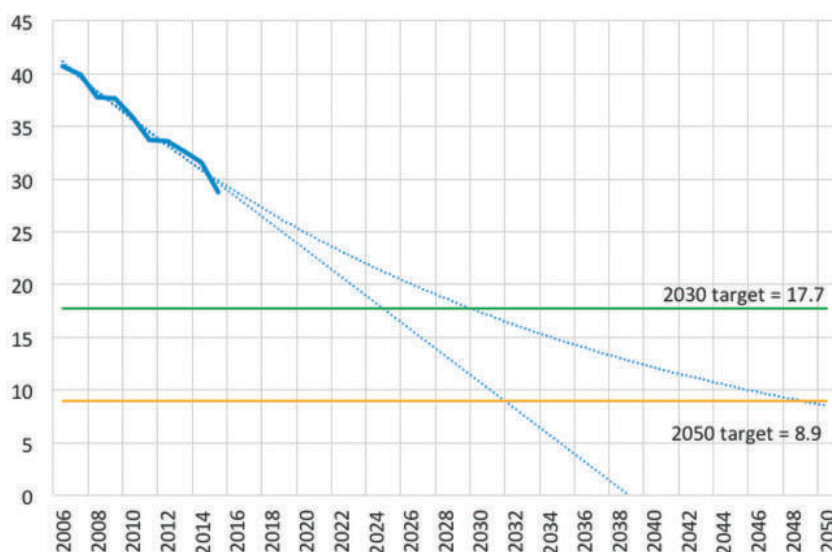


Figura 16 – Previsioni lineari ed esponenziali per le emissioni specifiche di gas a effetto serra per passeggero chilometro derivanti dalla combustione di carburante dei treni nel Regno Unito.

Figure 16 – Linear and exponential forecast for the specific greenhouse gas emissions per passenger kilometre from fuel combustion in trains in the United Kingdom.

cates that it would be very likely that the emissions would meet the same targets as the other countries if they were compared to the 1990 data. This is because the 1990 specific emissions were significantly higher than the 2006 emissions, thus the percentage decrease from 1990 would be far higher than from 2006.

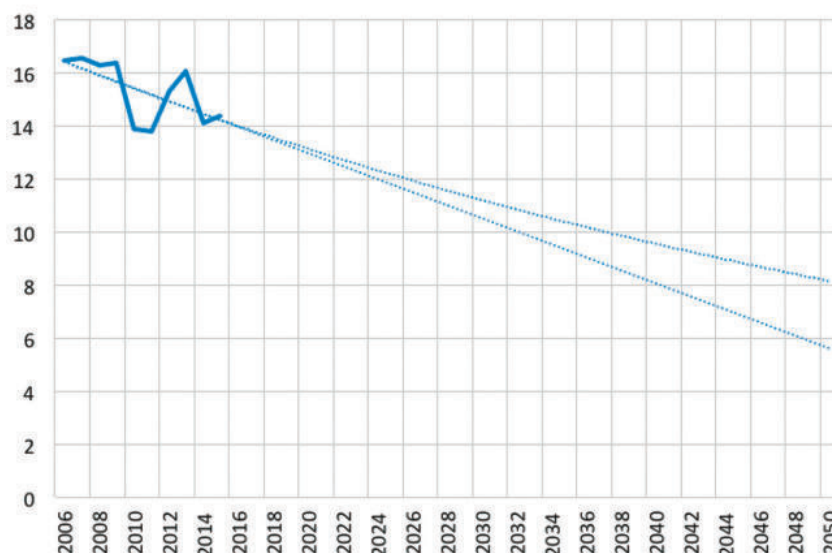


Figura 17 – Previsioni lineari ed esponenziali per le emissioni specifiche di gas a effetto serra per passeggero chilometro derivanti dalla combustione di carburante dei treni in Norvegia.

Figure 17 – Linear and exponential forecast for the specific greenhouse gas emissions per passenger kilometre from fuel combustion in trains in Norway.

Tabella 5 – Table 5

Riepilogo di quando ciascun paese raggiungerà gli obiettivi di emissione dell'Unione Europea
Summary of when each country will achieve the European Union emissions targets

| Paese Country | Obiettivo 2030 2030 Target | | Obiettivo 2050 2050 Target | |
|-------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|---|
| | Modello lineare Linear model | Modello esponenziale Exponential model | Modello lineare Linear model | Modello esponenziale Exponential model |
| Danimarca Denmark | No | No | No | No |
| Finlandia Finland | 2011,9 | 2011,7 | 2.019,3 | 2.023,0 |
| Svezia Sweden | 2.006,6 | 2.006,8 | 2.015,8 | 2.016,6 |
| Regno Unito United Kingdom | 2.024,5 | 2.029,4 | 2.031,5 | 2.048,7 |
| Norvegia Norway | N/D N/A | N/D N/A | N/D N/A | N/D N/A |

del 2050. Se dovessero seguire una tendenza lineare, le emissioni dovrebbero diminuire di 0,75g CO₂e/PKT ogni anno per raggiungere l'obiettivo. Se si seguisse una tendenza esponenziale, le emissioni dovrebbero scendere del 3,2% su base annua per raggiungere l'obiettivo.

5. Conclusioni

Sono stati studiati tre indicatori chiave di prestazione, utilizzando i dati provenienti principalmente da Eurostat, per avere una panoramica delle prestazioni di cinque sistemi di trasporto ferroviario di passeggeri in Europa riguardo alle emissioni di gas a effetto serra. Il primo indicatore era il funzionamento dei treni sulla rete ferroviaria. Poiché il traffico misto è gestito sulle reti ferroviarie dei cinque paesi in esame, i dati analizzati riguardavano sia i treni passeggeri che i treni merci. Si è constatato che in tutti i paesi i chilometri percorsi dai treni merci è in costante calo, in particolare in Finlandia e Svezia, che tradizionalmente hanno gestito un gran numero di treni merci sulle loro reti. Ciononostante, le tonnellate chilometro non sono diminuiti di un tasso così lineare, il che suggerisce che ci sono stati miglioramenti nell'efficienza del trasporto merci su rotaia trasportando più massa per treno. Con la diminuzione di tonnellate merci chilometro, i passeggeri chilometro per ferrovia sono aumentati notevolmente. Ciò indica che è in atto un cambiamento negli stili di vita e nelle abitudini di viaggio delle persone in quanto sempre più persone scelgono la ferrovia come mezzo di trasporto preferito ogni anno.

Successivamente, sono state studiate le emissioni di gas serra come indicatore chiave di prestazione. È stato accertato che solo due paesi (Finlandia e Svezia) hanno regi-

As discussed, to produce these forecasts, two types of regression were used: linear regression and exponential regression. It is not known which, if any, model the countries' emissions are most likely to follow. A linear trend would mean that the countries would have to maintain reducing their specific emissions by a constant amount each year. This would be very difficult, especially after a number of years when they have already managed to lower their emissions significantly. Reducing emissions is easier when the emissions are high than low as there is more scope for improving inefficiencies and upgrading the network. An exponential model solves this problem as the regression is based on a country decreasing their emissions by a fixed percentage each year. This means that as their emissions get lower, the amount they must decrease them by also decreases. A limitation with the ex-

ponential model is that as time goes on, the fall in emissions may not slow down as technological advances will make it easier and cheaper for countries to reduce emissions. The true values for the specific emissions will likely follow a combination of the two models, with the emissions falling at a fast linear rate when large new developments and technologies are implemented, but will follow a slower exponential model as day-to-day operational inefficiencies are improved upon.

If the specific greenhouse gas emissions in Denmark begin to decline, the amount they need to decrease their emissions by to reach the 2050 target can be calculated. If they were to follow a linear trend, the emissions would need to decrease by 0.75g CO₂e/PKT each year to reach the target. If an exponential trend was followed, the emissions would have to fall by 3.2% year on year for the target to be met.

5. Conclusions

Three key performance indicators have been investigated, using data primarily sourced from Eurostat, to get an overview of how five rail passenger systems in Europe are performing in relation to greenhouse gas emissions. The first indicator was the operation of trains on the rail network. Because mixed traffic is operated on the rail networks of the five countries under study, the data analysed was for both passenger and freight trains. It was found that in every country, the train kilometres travelled by freight trains is steadily falling, especially in Finland and Sweden who traditionally have operated a large number of freight trains on their networks. Despite this, tonne kilometres have not fallen by such a linear rate, suggesting there have been improvements into the efficiency of rail freight transport by carrying

strato una riduzione significativa dei gas a effetto serra prodotti dalla combustione di carburante dei treni dal 2006. Gli altri tre paesi sono rimasti invariati o hanno aumentato leggermente le emissioni di gas a effetto serra. Questo cambiamento, tuttavia, è probabilmente attribuibile al grande aumento del numero di passeggeri durante il periodo di analisi decennale. Se si considerano le emissioni specifiche di biossido di carbonio in termini di chilometri percorsi dai passeggeri, tutti i paesi ad eccezione della Danimarca hanno registrato un forte calo tra il 2006 e il 2015. Ciò implica che, nonostante un aumento delle emissioni assolute di gas a effetto serra, il trasporto ferroviario sta effettivamente diventando più rispettoso dell'ambiente a causa della riduzione delle emissioni specifiche. La mancanza di riduzione delle emissioni assolute di gas a effetto serra è probabilmente compensata da una riduzione delle emissioni dei veicoli passeggeri. È stato fatto un confronto tra le emissioni ferroviarie e le emissioni delle autovetture ed è emerso che solo in due paesi (Danimarca e Regno Unito) la condivisione delle automobili ridurrebbe le emissioni specifiche in modo da produrre meno emissioni per passeggero chilometro con il viaggio in treno.

L'indicatore di prestazione chiave finale ha studiato l'uso dell'elettricità come mezzo di propulsione del veicolo. È stato dimostrato che il Regno Unito e la Danimarca hanno la percentuale più bassa di binari elettrificati nelle loro reti, tuttavia ciò è atteso poiché l'intensità di carbonio della produzione di elettricità in questi paesi è molto più elevata rispetto agli altri tre paesi. Le emissioni di due tipi di treni elettrici con diversi fattori di carico sono state stimate per ciascun paese e sono state quindi confrontate con un veicolo elettrico a batteria. In tutti i paesi, il treno ad alto fattore di carico ha prodotto un minor numero di gas serra per passeggero chilometro rispetto all'auto elettrica, tuttavia se confrontato con i treni con un fattore di carico inferiore l'auto elettrica ha ottenuto prestazioni migliori. In Svezia e Norvegia, la generazione di elettricità è quasi a zero emissioni di carbonio. Ciò significa che sia le auto elettriche che i treni in questi paesi rilasciano pochissimi gas serra e rappresenterebbero entrambi un'eccellente modalità di trasporto per il futuro.

Sono stati quindi raccolti i dati per i gas a effetto serra prodotti dalla combustione di carburante dei treni per passeggero chilometro ed è stata fatta una previsione utilizzando due diversi modelli. È stato accertato che la Finlandia, la Svezia e il Regno Unito sono tutti sulla buona strada per raggiungere gli obiettivi stabiliti dall'Unione Europea in materia di emissioni per il 2030 e il 2050. Le emissioni specifiche in Danimarca stavano aumentando nel periodo in cui i dati sono stati analizzati. Ciò ha quindi dimostrato che con i modelli utilizzati non avrebbe raggiunto gli obiettivi di emissione. Il tasso al quale la Danimarca dovrebbe ridurre le proprie emissioni è stato $-0,75 \text{ g CO}_2\text{e/PKT}$ all'anno o $-3,2\%$ all'anno in base al modello seguito. Non erano disponibili dati storici sui passeggeri per la Norvegia, il che significa che gli obiettivi di emissione non potevano essere calcolati.

more mass per train. As freight tonne kilometres have fallen, rail passenger kilometres have increased dramatically. This indicates that there is an ongoing change in peoples' lifestyles and travel habits as more people are choosing rail as their preferred mode of transport each year.

Next, greenhouse gas emissions were investigated as a key performance indicator. It was found that only two countries (Finland and Sweden) have had any significant decrease in the greenhouse gases produced from fuel combustion in trains since 2006. The three other countries either remained the same or slightly increased their greenhouse gas emissions. This change, however is likely attributable to the large increase in ridership during the ten year analysis period. When considering the specific carbon dioxide emissions in terms of passenger kilometres travelled, all countries except Denmark had a large decrease between 2006 and 2015. This implies that despite an increase in absolute greenhouse gas emissions, rail transport is actually getting more environmentally friendly due to the decreased specific emissions. The lack of decline in absolute greenhouse gas emissions is likely offset by a decrease in passenger vehicle emissions. A comparison was made between rail emissions and passenger car emissions and it was found that only in two countries (Denmark and the United Kingdom) would car sharing reduce specific emissions enough to produce fewer emissions per passenger kilometre as rail travel.

The final key performance indicator investigated the use of electricity as a means of vehicle propulsion. The United Kingdom and Denmark were shown to have the lowest proportion of electrified rail track in their networks, however this is expected as the carbon intensity of electricity production in those countries is far higher than the three other countries. The emissions from two types of electric trains with different load factors were estimated for each country and were then compared to a battery electric vehicle. In all of the countries, the high load factor train produced fewer greenhouse gases per passenger kilometre than the electric car, however when compared to trains with a lower load factor the electric car performed better. In Sweden and Norway, electricity generation is close to being carbon neutral. This means that both electric cars and trains in these countries release very few greenhouse gases and would both be an excellent transport mode for the future.

The data for the greenhouse gases produced from fuel combustion in trains per passenger kilometre was then taken and a forecast was produced using two different models. It was found that Finland, Sweden and the United Kingdom are all on track to meet the emissions targets for 2030 and 2050 as set by the European Union. The specific emissions in Denmark had been increasing over the period for which the data was analysed. This therefore showed that with the models used, it would not meet the emissions targets. The rate at which Denmark would have to reduce their emissions was found to be $-0.75 \text{ g CO}_2\text{e/PKT}$ per year or -3.2% per year depending which model was followed. There was no

Tuttavia, le linee di tendenza sul grafico indicano che le emissioni stanno diminuendo a un ritmo costante.

In conclusione, sembra che il sistema di trasporto ferroviario passeggeri con le migliori prestazioni in termini di gas a effetto serra prodotti tra i cinque paesi in esame sia la Svezia. La combinazione di generazione di elettricità, che ha un'intensità di carbonio molto bassa e oltre tre quarti del tracciato è elettrificato, significa che le emissioni di carbonio sono estremamente basse. La Svezia è quindi seguita dalla Finlandia e dalla Norvegia, che hanno entrambe un tracciato più elettrificato che non. L'intensità di carbonio per la generazione di elettricità in Norvegia è quasi zero, il che significa che se la Norvegia continua a elettrificare maggiormente i suoi tracciati, potrebbe avere una rete ferroviaria quasi a zero emissioni di carbonio. La Danimarca e il Regno Unito hanno emissioni specifiche notevolmente più elevate sulla loro rete ferroviaria. Sebbene l'elettrificazione ferroviaria sia stata molto positiva per Svezia, Finlandia e Norvegia, la generazione di elettricità più intensa in termini di emissioni di carbonio nel Regno Unito e in Danimarca potrebbe significare che questa non è una soluzione praticabile per ridurre le emissioni. Il Regno Unito ha ridotto in modo rilevante le emissioni specifiche a causa dell'aumentato numero di passeggeri nel periodo di dieci anni. Tuttavia, i passeggeri chilometro percorsi sulla rete ferroviaria in Danimarca hanno mostrato una tendenza negativa su tutti e cinque i paesi analizzati. Di conseguenza, le emissioni specifiche per le ferrovie in Danimarca sono aumentate. Svezia e Finlandia superano gli obiettivi molto rapidamente, quindi si potrebbe raccomandare in futuro di fissare un obiettivo ancora più ambizioso.

6. Ricerca ulteriore

I dati disponibili al pubblico che consentivano di distinguere tra le emissioni dei treni elettrici e dei treni diesel o tra treni passeggeri e treni merci erano limitati e incompleti. Se questi dati potessero essere resi disponibili, si studierebbe il trasporto merci per determinare anche quale tipo di traffico ferroviario rappresenta la maggior parte delle emissioni di gas a effetto serra.

Sarebbe inoltre interessante studiare le emissioni specifiche per altre modalità di trasporto come l'aviazione domestica e i viaggi in autobus nelle stesse serie temporali. Ciò fornirebbe un quadro più completo di come il settore dei trasporti si sta adattando sia all'aumento della domanda sia alle maggiori pressioni per ridurre le emissioni di gas a effetto serra. Dovrebbero quindi essere discussi in dettaglio diversi metodi per il calcolo delle emissioni di gas a effetto serra da tutte le modalità di trasporto e la loro precisione.

Infine, le emissioni considerate nella presente ricerca erano solo gas a effetto serra. Uno studio su altri inquinanti atmosferici come il monossido di azoto (NO_x), i composti organici volatili (COV) e il particolato (PM_{10}) darebbe un'idea di come il settore dei trasporti stia influenzando la qualità dell'aria in ciascun paese.

historic ridership data available for Norway, meaning the emissions targets could not be calculated.

However the trend lines on the graph indicate that the emissions are falling at a steady rate.

In conclusion it appears that the best performing rail passenger system in terms of greenhouse gases produced amongst the five countries under study is Sweden. The combination of electricity generation, which has a very low carbon intensity and over three quarters of the rail track being electrified means that the carbon emissions are extremely low. Sweden is then followed by Finland and Norway who both also have more electrified track than non-electrified track. The carbon intensity for electricity generation in Norway is almost zero, meaning if Norway continues to electrify more of its track, it could have a nearly carbon neutral rail network. Denmark and the United Kingdom have considerably higher specific emissions on their rail network. Although rail electrification has been very positive for Sweden, Finland and Norway, the more carbon-intense electricity generation in the United Kingdom and Denmark could mean that this is not a viable solution to decrease emissions. The United Kingdom has decreased the specific emissions significantly due to the increased ridership over the ten year period. However the passenger kilometres travelled on the rail network in Denmark showed a negative trend out of all of the five countries analysed. Consequently, the specific emissions for the railways in Denmark have been rising. Sweden and Finland surpass the targets very quickly, so it could be recommended that an even more ambitious target could be set in the future.

6. Further research

There was a limited and incomplete data publicly available that would make it possible to distinguish between the emissions from electric trains and diesel trains, or between passenger trains and freight trains. If this data could be made available it would be studied freight to also determine which type of rail traffic is accounting for the most greenhouse gas emissions.

It would also be of interest to investigate the specific emissions for other modes of transport such as domestic aviation and bus travel over the same time series. This would provide a fuller picture of how the transport sector is adapting to both increased demand and increased pressures to decrease greenhouse gas emissions. Different methods for calculating greenhouse gas emissions from all transport modes and their accuracy should then be discussed in detail.

Lastly, the emissions considered in this investigation were only greenhouse gases. A study into other air pollutants such as mono nitrogen oxides (NO_x), volatile organic compounds (VOCs) and particulate matter (PM_{10}) would give an insight into how the transport sector is affecting the air quality in each country.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Department for Transport, (2018), "*Vehicles statistics*", [Online: accessed on 15th July, 2019], Available at: <https://www.gov.uk/government/collections/vehicles-statistics>.
- [2] Ecometrica, (2011), "*Electricity-specific emission factors for grid electricity*", s.l.: s.n.
- [3] T. ESTERS, M. MARINOV, (2014). "*An analysis of the methods used to calculate the emissions of rolling stock in the UK*". *Transportation Research Part D: Environment and Transport* 2014, 33, 1-16.
- [4] European Commission, (2012). "*Energy Roadmap 2050*", Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [5] European Commission, (2014 a). "*2030 Framework for Climate and Energy*", s.l.: s.n.
- [6] European Commission, (2014 b). "*Regulation (EU) no 333/2014 of the European Parliament and of the Council*". *Official Journal of the European Union*.
- [7] European Environment Agency, (2010). "*Occupancy rates of passenger vehicles*", Copenhagen: s.n.
- [8] Eurostat, (2018). "*Environment Statistics*". [Online].
[Online: accessed on 15th July, 2019] Available at: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.
- [9] European Environment Agency, (2018). "*Greenhouse gas emissions from transport*".
[Online: accessed on 15th July, 2019], Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-11>.
- [10] B. DALLA CHIARA, (2010). "*Considerazioni sulla domanda ed impiego di energia nei sistemi di trasporto*" / "*Considerations on the demand and use of energy in the transport systems*", *Ingegneria Ferroviaria*, vol. LXV, ISSN: 0020-0956. Numero 7-8, pagg. 673-685, July-August.
- [11] E. A. a. P. LUKASZEWICZ, (2006). "*Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains*", Stockholm: s.n.
- [12] A. FRASZCZYK, T. LAMB, M. MARINOV, (2016). "*Are railways really that bad? An evaluation of rail systems performance in Europe with a focus on passenger rail*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*".
- [13] OECD, (2018). "*Transport infrastructure investment and maintenance spending : Investment Spending*". [Online: accessed on 15th July, 2019], Available at: <https://stats.oecd.org/>.
- [14] The World Bank, (2018). *DataBank*. [Online: accessed on 15th July, 2019], Available at: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&series=IS.RRS.PASG.KM>.
- [15] Vehicle Certification Agency, (2018). "*Vehicle details for NISSAN Leaf Leaf 30kWh*". [Online: accessed on 15th July, 2019] Available at: <http://carfueldata.dft.gov.uk/search-new-or-used-cars.aspx?vid=38142>.
- [16] C. WORONIUK, M. MARINOV, T. ZUNDER, P. MORTIMER, (2013). "*Time series analysis of rail freight services by the private sector in Europe*". *Transport Policy*, Volume 25, pp. 81-93.
- [17] N. COLTRO, L. SACCO, B. DALLA CHIARA, (2011). "*Calculations of the carrying capacity and energy consumption on the Turin-Modane railway connection: application of models and simulation*" / "*Calcolo della potenzialità e dei consumi energetici del collegamento ferroviario Torino-Modane applicazione di modelli e simulazione*", *Ingegneria Ferroviaria*, vol. LXVI, ISSN: 0020-0956. N 10, pagg. 831-858, Oct.
- [18] B. DALLA CHIARA, D. DE FRANCO, N. COVIELLO, D. PASTRONE, (2017), "*Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*", Volume 52, Part A, May, Pages 227-243.
- [19] T. GRIGORATOS and G. MARTINI, "*Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM*, Luxembourg: Publications Office of the European Union 2014" – 53 pp. – 21.0 x 29.7 cm EUR – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (online), ISSN 1018-5593 (print).