

Hagrannsóknir sf

Um kostnað vegna umferðartafa á höfuðborgarsvæðinu

Drög



Mars 2022

Formáli

Í þessari skýrslu er leitast við að leggja mat á þann kostnað sem umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu valda. Skýrslan er gerð að ósk Samgangna fyrir alla (SFA) og með fjárhagsstuðningi frá Rannsóknarmiðstöð um samfélags og efnahagsmál (RSE). Að gerð skýrslunnar hafa einkum unnið Elías Elíasson verkfræðingur, Jónas Elíasson prófessor, Ragnar Árnason prófessor og Þórarinn Hjaltason samgönguverkfræðingur.

Fyrir hönd Hagrannsóknna sf


Ragnar Arnason

Efnisyfirlit

	Bls.
Helstu niðurstöður: Samantekt	
0. Inngangur	1
1. Gildi greiðra samgangna fyrir framleiðslu, hagvöxt og hagsæld	3
1.1 Samgöngur innan borga og þéttbýlissvæða	4
1.2 Mælingar á verðmæti samgangna	4
2. Tafakostnaður: Fræðilegur grundvöllur	5
2.1 Ferðatími: ferðatafir	5
2.2 Tímavirði: Fræðileg grundvallaratriði	9
2.3 Tafakostnaður	12
2.4 Fjárfesting í vegabótum	13
3. Mat á tafatíma	17
3.1 Mat á grundvelli TomTom umferðarmælinga	17
3.2 Mat á grundvelli spurningakönnunar	21
3.3 Mat á grundvelli fjölda bílferða	23
3.4 Samantekt: umræða	25
4. Tímavirði tafa	27
4.1 Vinnutekjur	27
4.2 Aðrar rannsóknir á tímavirði	29
4.3 Niðurstaða	30
5. Kostnaður við umferðartafir	31
5.1 Leiðrétting á tímavirði vegna mismunandi hópa	31
5.2 Mat á kostnaði við umferðartafir	32
Tilvísanir	34
Viðaukar	36
2.A Útleiðsla á líkingu (7) í meginmáli	36
2.B Um val á ferðamáta	37
3.A Notkun TomTom tafagildis til að meta umferðartafir	38
3.B Fjöldi bílferða á höfuðborgarsvæðinu	40
5.A Mismunandi hópar í umferðinni	42

Helstu niðurstöður. Samantekt

- Greiðar samgöngur er ein helsta grunnstoð framleiðni og hagvaxtar og veigamikill þáttur í hagsæld fólks. [Kafli 1]
- Umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu hafa farið mjög vaxandi á undanförunum árum. [Kafli 0]
- Því miður hafa skipulegar mælingar á umferðartöfum á höfuðborgarsvæðinu ekki verið gerðar. Í þessari skýrslu hefur því reynst óhjákvæmileg að beita óbeinum matsaðferðum til að áætla þessar umferðartafir. Ein af afleiðingum þessa er að óvissubíl matsins eru víðari en ella væri. [Kaflar 0 og 3]
- Tafatími í umferð á höfuðborgarsvæðinu var metinn með þremur mismunandi aðferðum. Samkvæmt þeim telst þessi tafatíma hafa verið á bilinu 27 til 66 þúsund klukkustundir að jafnaði á hverjum virkum degi ársins 2019. Á öllu árinu 2019 er þessi tafatími talinn hafa verið 9 til 20 milljón klukkustundir. [Kafli 3].
- Fyrirliggjandi þekking er ekki næg til að unnt sé að leggja nákvæmt mat á tímavirði í umferð á höfuðborgarsvæðinu. [Kafli 4]
- Virði tafatíma í umferð á höfuðborgarsvæðinu frá sjónarmiði einstaklinga er talið hafa verið á bilinu 2900-7200 kr./klst. á árinu 2019. Þjóðhagslegt virði sama tafatíma er talið hafa verið á bilinu 6800-10200 kr./klst. [Kafli 4.3]
- Kostnaður einstaklinga vegna umferðartafa á höfuðborgarsvæðinu á árinu 2019 er talinn vera á bilinu 36-90 mia. kr. Miðja þess bils er í námunda við 60 mia. kr. [Kafli 5.2]
- Þjóðhagslegur kostnaður vegna sömu umferðartafa á árinu 2019 er talinn vera talsvert hærri eða á bilinu 90 til 170 mia. kr. [Kafli 5.2]

0. Inngangur

Alkunna er að umferðartafir hafa vaxið mjög á höfuðborgarsvæðinu allmörg undanfarin ár. Samkvæmt könnun Land-ráðs (Land-ráð 2018) óx ferðatími á höfuðborgarsvæðinu um næstum helming milli árána 2007 og 2018. Ætla má að stærsti hluti þessarar aukningar í ferðatíma sé vegna vaxandi umferðartafa. Athuganir sem Samtök iðnaðarins hafa gert (SI 2018) benda til að kostnaður samfélagsins af þessum sökum nemi mjög háum fjárhæðum á ári hverju.¹

Að frátalinni ofangreindri athugun SI (SI 2018) virðist ekki hafa verið gerðar kerfisbundnar rannsóknir á þeim kostnaði sem umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu hafa valdið. Þessi skýrsla felur í sér viðleitni til að bæta úr þeirri vöntun.

Við gerð skýrslunnar hefur komið í ljós að mikið skortir á að traust gögn til að meta þennan kostnað séu fyrir hendi. Er þar tilfinnanlegast að skipulegar mælingar á raunverulegum umferðartöfum á höfuðborgarsvæðinu virðast ekki hafa verið gerðar. Til þess að slíkar mælingar séu sæmilega áreiðanlegar þurfa þær að vera nokkuð viðamiklar og þar með að sama skapi kostnaðarsamar. Það hefur því ekki verið á færi aðstandenda þessarar skýrslu að framkvæma slíkar grunnmælingar. Öðru máli gegnir um hið opinbera, ríkið og sveitarfélögin á höfuðborgarsvæðinu. Þessir aðilum hefur verið falið það hlutverk fyrir hönd borgaranna að tryggja sem bestar samgöngur. Til þessa verkefnis innheimta þeir ríflega skatta af margvíslegu tagi. Fyrir þessa umsjónarmenn umferðarkerfisins eru skipulegar mælingar á umferðartöfum því fjárhagslegt smáatriði. Þar að auki eru þær nauðsynlegar til þess að þeir geti unnið verk sitt vel, þar á meðal það að meta hagkvæmni mismunandi fjárfestinga í umferðarmannvirkjum og heppilegustu tímasetningar þeirra.

Vegna þessa skorts á grunnögnum hefur reynst óhjákvæmileg í þessari athugun að beita óbeinum og þar með ófullkomnum matsaðferðum til að áætla umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu og þann kostnað sem þær valda. Afleiðing er að óvissubilin sem ætla má að rúmi hinn sanna kostnað eru miklu víðari en ella gæti verið. Niðurstaðan er þó engu að síður afráttarlaus: Kostnaður samfélagsins vegna umferðartafa á höfuðborgarsvæðinu er örugglega mjög mikill og nemur tugum milljarða króna á ári hverju.

Skýrsla þessi er þannig skipulögð að í fyrsta kafla er fjallað almennt um gildi greiðra samgangna fyrir framleiðslu, hagvöxt og hagsæld fólksins. Þennan kafla teljum við nauðsynlegan vegna þess að okkur hefur fundist skorta á hér á landi að hagrænt gildi góðra samgangna sé metið að verðleikum.

Í öðrum kafla skýrslunnar er farið yfir fræðilegan grundvöll mats á umferðartöfum og kostnaði við þær. Sá kafla leggur m.a. grunn að matinu á tímavirði síðar í skýrslunni. Þar er einnig fjallað með einföldum hætti um samspil umferðartafa og hagkvæmstu fjárfestinga í umferðarmannvirkjum og líkingar fyrir hagkvæmstu fjárfestingarreglur leiddar út.

Í þriðja kafla skýrslunnar er reynt að leggja mat á tafir í umferð á höfuðborgarsvæðinu og beitt til þess þremur mismunandi aðferðum. Niðurstaðan er að árinu 2019 hafi þessar tafir

¹ Nánar tiltekið töldu SI í athugun sinni að kostnaður vegna tafa í umferðinni væri yfir 15 milljarða króna árið 2018 (SI 2018).

líklega verið á bilinu 9-20 milljón klst. Er það nokkru hærra mat en í fyrrgreindri athugun SI (SI 2018) sem miðaðist við árið 2017.²

Í fjórða kafla skýrslunnar er lagt mat á virði þess tíma fólks sem fer í umferðartafir. Meðaltal þess mats var um 5000 kr./klst. miðað við launakjör og verðlag ársins 2019. Er það mat á tímavirði á svipuðum slóðum og tiltölulega nýlegt mati á vegum Reykjavíkurborgar (Mannvit og Cowi 2020). Óvissubilið þessa mats er hins vegar mjög vítt eða frá 2900 til 7200 kr./klst.

Í fimmta kafla skýrslunnar eru niðurstöður um tafakostnað á höfuðborgarsvæðinu dregnar saman. Niðurstöðurnar eru að þessi tafakostnaður hafi að líkindum verið á bilinu 36-90 mia. kr. á árinu 2019.

² Í skýrslu sinn telur SI að á árinu 2017 hafi umferðartafir numið um 6 milljón klst.

1. Gildi greiðra samganga fyrir framleiðslu, hagvöxt og hagsæld

Enginn vafi er á því að bættar samgöngur hafa verið einn helsti aflavaki aukinnar framleiðslu og hagvaxtar í þróunarsögu mannkyns. Fyrir þeirri niðurstöðu eru bæði hagfræðileg rök og hagsögulegur vitnisburður.

Í einu grundvallarriti hagfræðinnar, Auðlegð þjóðanna, útskýrir Adam Smith (1776) hvernig verkaskipting og markaðsviðskipti eru nauðsynlegar forsendur aukinnar framleiðslu. Verkaskipting er forsenda aukinnar framleiðslu á mann. Sérhæfður framleiðandi verður hins vegar að geta skipt á framleiðslu sinni og öðrum lífsnauðsynjum. Til þess þarf hann aðgang að markaði. Til þess að sá markaður geti verið til þarf að flytja vörurnar milli hinna sérhæfðu framleiðenda. Sé það ekki unnt eða of dýrt getur ekki orðið um verkaskiptingu að ræða. Þannig má ljóst vera að gæði samgangna setja mögulegri verkaskiptingu efri mörk. Séu samgöngur lélegar (dýrar, ógreiðar og óruggar) eins og var víða í heiminum fyrr á öldum getur verkaskipting ekki orðið mikil og þar með ekki heldur framleiðsla á mann. Séu samgöngur hins vegar góðar (ódýrar, greiðar, öruggar) gefur það kost á stærri mörkuðum og þar með meiri verkaskiptingu og aukinni framleiðslu á mann.

Þessar kenningar A. Smith spruttu ekki upp í tómarúmi. Á sautjándu og átjándu öldinni urðu miklar framfarir í flutningatækni bæði á sjó og landi. Hvað mest áberandi á þessum tíma voru hinar stórstígu framfarir í skipaflutningum sem tengdu saman fjarlægja markaði heimsins og margfölduðu alþjóðaviðskipti og þar með verkaskiptingu í heiminum (sjá t.d. Flynn 1966, Rodrigue 2020 og Rodrigue og Notteboom 2020). Minna áberandi en ekki síður mikilvægar voru hliðstæðar samgöngubætur á landi með bættum vegum, skipaskurðum og miklu meira ferðaöryggi en áður var. Þessar bættu samgöngur stækkuðu markaði og stórjuku verkaskiptingu með tilheyrandi hagvexti og tekjuaukningu. Þetta var auðvitað sú þróun sem A. Smith hafði fyrir augunum þegar hann setti fram kenningar sínar.

Þessar fræðikenningar ríma einnig vel við viðteknar sögulegar staðreyndir. Samgöngur hafa verið að batna um gjörvalla veröld í árþúsundir og sú þróun hefur haldist í hendur við vaxandi framleiðslu á mann.

Lengi framan af mannkynssögunni voru helstu samgönguleiðir ár og vötn. Helstu efnahagsveldi fornaldar urðu einmitt til við slíka vatnavegi. Nægir í því efni að benda á Egyptaland, ríkin í Mesapótamíu við árnar Evrat og Tígrið, Mið-Kína á vatnasvæði Yangtze og ríkin á Indlandi við stórárnar á þeim mikla skaga. Síðari efnahagsveldi heimsins eins og Rómarríki, borgríki Ítalíu, Niðurlönd og England byggðu einnig í upphafi á skipgöngum ám, góðum höfnum og greiðum aðgengi að hafinu.

Á grundvelli auðlegðar sem í upphafi byggist á samgönguleiðum náttúrunnar bættu margar viðkomandi þjóðir síðan samgöngur með hafnagerð, brúm og vegalagningu, og byggðu upp nýjar samgönguaðferðir. Framan af fólust þær í betri skipakosti og bættum vöðvaknúnum farartækjum landi. Með vélvæðingu iðnbyltingarinnar komu járnbrautir, bílar og flugvélar. Hagsögufræðingar hafa sýnt fram á náið samband er á milli samgöngubóta af þessu tagi og hagvaxtar viðkomandi ríkja (sjá t.d. Pawson 1979 og Weisbrod 2008 og tilvísanir í ritum þeirra).

Það er því ekki af ástæðulausu sem hagsögufræðingar frá Smith (1776) á átjándu öldinni til tuttugustu aldar hagfræðinganna Marshalls (1919), Schumpeters (1931), North (1958),

Kuznets (1966) og Rostows (1971) hafa allir lagt áherslu á þátt samgangna og samgöngubóta í efnahagsþróun og hagvexti. *Þetta er aðallega flutningateknin*

1.1 Samgöngur innan borga og þéttbýlissvæða

Um samgöngur innan borga og þéttbýlissvæða gilda nákvæmlega sömu lögmál og um samgöngur milli landsvæða og ríkja. Því greiðari sem þessar samgöngur eru þeim mun meiri verður skilvirkni í framleiðslu og þar með tekjur og hagsæld.

Frá sjónarmiði fyrirtækja er þetta augljóst. Flutningar vöru og fólks milli staða er kostnaður. Ef samgöngur eru greiðar er þessi kostnaður lágur. Ef þær eru torveldar er kostnaðurinn hár. Samgöngugæði eru því veigamikill þáttur í samkeppnishæfni. Góðar samgöngur þýða samsvarandi sterkari samkeppnisstöðu og lélegar samgöngur veikari samkeppnisstöðu. Því sækjast fyrirtæki eftir því að öðru jöfnu að staðsetja sig þar sem samgöngur eru góðar. Versni samgöngur getur það orðið til þess að fyrirtækin fari annað og starfsfólkið í kjölfarið.

Það sama á við um fólkið þótt e.t.v. sé það ekki eins augljóst. Fyrir fólk eru flutningar milli staða einnig kostnaður. Sá kostnaður er fyrst og fremst verðmæti þess tíma sem fer í að komast milli staða og auk þess bein og óbein ferðaútgjöld. Greiðar samgöngur eru því mikilvæg lífsgæði fyrir fólk. Fari samgöngur versnandi rýrir það lífsgæðin ekkert síður en verðhækkningar á nauðsynjavörum. Viðbrögð fólksins við slæmum samgöngum eru því eins og viðbrögð fyrirtækja. Það forðast að setjast að á stöðum þar sem samgöngur eru vondar og flytst frá stöðum þar sem þær versna nægilega mikið. Þar að auki leitast starfsfólk jafnan við að fá bætur frá fyrirtækjum vegna tímafrekra eða erfiðra samgangna. Þannig lendir hluti af kostnaði fólks vegna lélegra samgangna einnig á fyrirtækjunum.

Allt ber þetta að sama brunni. Veigamikill þáttur í líf skjörum fólks og rekstrarskilyrðum fyrirtækja eru greiðar samgöngur. Það er engin tilviljun að á þeim svæðum heimsins þar sem framleiðsla á mann er hvað mest eru samgöngur jafnframt greiðastar. Það er erfitt að finna undantekningar frá þeirri reglu að á svæðum þar sem framleiðsla á mann er óvenju mikil séu samgöngur jafnframt óvenju greiðar.

1.2 Mælingar á verðmæti samgangna

Mikilvægt er að átta sig á, að það lykilhlutverk sem góðar samgöngur hafa fyrir framleiðslustarfsemina endurspeglast ekki beinlínis í hefðbundnum hagtölum. Ástæðan er sú að slíkar hagtölur mæla jafnan verðmæti sem margfeldi notaðs magns og verðs. Verðið er markaðsverð, sem við sæmilega virka samkeppni er nálægt framleiðslukostnaði. Því er það að þeim mun ódýrari sem samgöngur eru, þeim mun minna verðmæti mælast þær hafa í hagtölunum. Heildargildi samgangna fyrir efnahagslíf og velsæld mælist því ekki í venjulegum hagtölum frekar en gildi margra nauðsynja eins og t.d. vatns. Hefðbundnar hagtölur mæla einfaldlega ekki heildarvirði fyrirbæra. Þær mæla aðeins jaðarvirði þeirra.

Það er aðeins ein leið til að mæla heildarverðmæti tiltekinna vara eða fyrirbæra. Hún er að mæla breytingu í framleiðslu (eða það sem betra er hagsæld) án viðkomandi fyrirbæris. Augljóst er að án samgangna færum við aftur niður á steinaldarstigið. Frá þessu sjónarhorni eru góðar samgöngur efnahagsleg grunnstoð eins og t.d. markaðir eða eignarréttur, og nauðsynjar eins og vatn.

2. Tafakostnaður: Fræðilegur grundvöllur

Samgöngur í sinni einföldustu mynd eru ferðalag milli tveggja punkta. Ganga má að því vísu að aðilar kjósi að leggja í ferðalag vegna þess að þeir telja að ávinningur af ferðinni verði meiri en kostnaðurinn. Iðulega er val milli mismunandi ferðamáta. Aðilinn velur ætíð þann ferðamáta sem hámarkar hreinan ávinning hans af ferðinni. Sá ávinningur ræðst af eiginleikum ferðamátans (frá sjónarmiði aðilans). Helstir þessara eiginleika virðast vera:

1. Fjárútlát vegna ferðarinnar.

Þessi fjárútlát gæti t.d. greiðsla fyrir flutninginn, eða kostnaður viðkomandi af því að annast flutninginn sjálfur. Þar sem þessi kostnaður er fyrir alla ferðina má ætla að hann sé föst tala fyrir hvern ferðamáta sem ritaður er $C_0(i)$ í (1).

2. Sá tími sem ferðin tekur.

Hver ferðamáti tekur sinn tíma. Tími er verðmæti (sjá kafla 2.2. í þessari skýrslu). Þess vegna veldur ferðatíminn kostnaði sem ætla má að sé sem næst línulegur í ferðatíma.

3. Not (e. utility) meðan á ferð stendur

Meðan á ferð stendur hefur ferðalangur einhver not. Hann getur haft ánægju eða óánægju af ferðinni. Þessi eiginleiki er ábati ef ferðin er ánægjuleg en kostnaður ef ferðin er óánægjuleg.

4. Sú áhætta sem ferðalagið hefur í för með sér.

Slys geta orðið á ferðalögum og ferðamaður orðið fyrir tjóni. Slíkt tjón er hluti af ferðakostnaði. Sá kostnaður er auðvitað líkindastærð, en ferðamaður gerir sér væntanlega hugmynd um líkindadreifingu hannar.

Í þessari greinargerð beinist athyglin fyrst og fremst að eiginleika 2, ferðatímanum og þeim kostnaði sem hann veldur. Því er nálgunin sú að gert er ráð fyrir tilteknum ferðamáta og reynt að grafast fyrir um það hvaða kostnaði lengri ferðatími valdi.

Á hinn bóginn er vert að hafa í huga að ferðatími ræðst af þeim ferðamáta sem valinn er og heildarkostnaður vegna ferðatíma ræðst m.a. af því hversu margir kjósa að fara í viðkomandi ferð. Því skiptir val á ferðamáta máli fyrir kostnað vegna ferðatíma. Sæmileg umfjöllun um val á ferðamáta er hins vegar óhjákvæmilega nokkuð viðamikil og talsvert umfram það sem unnt er að fjalla um í þessari greinargerð. Í viðauka 2.B er þó dregið á nokkur grundvallaratriði varðandi þetta val.

2.1 Ferðatími, ferðatafir

Hugleiðum vegspotta. Hann getur verið (eða innihaldið) brú, gatnamót o.s.frv. Látum lengd vegspottans vera l . Án þess að glata neinum upplýsingum getum við sett þessa lengd í $l=1$

Tíminn sem það tekur að ferðast yfir þennan vegspotta er:

$$(1) \quad t = \frac{1}{s},$$

þar sem s er meðalhraðinn á leiðinni.

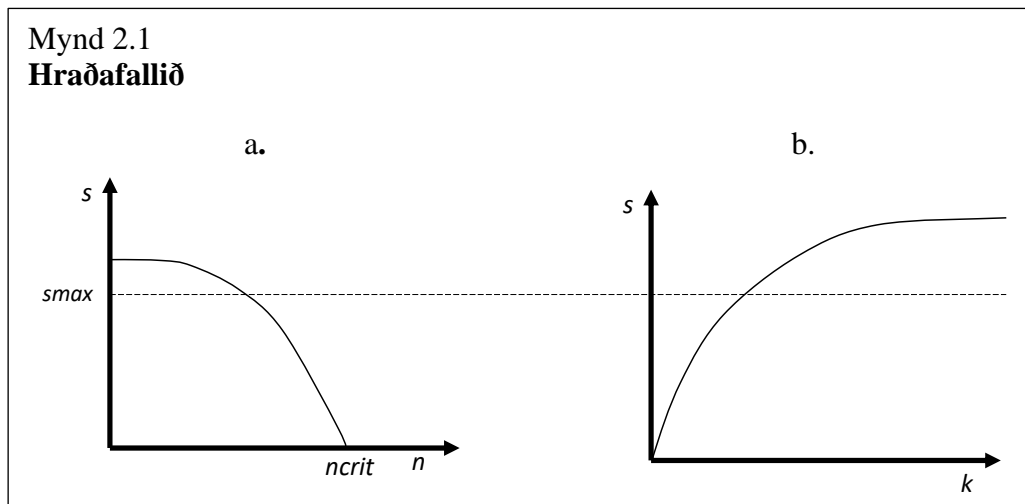
Þessi meðalhraði ræðst auðvitað af mörgum breytum, þ.á m. ökumanni og gæðum farartækis. Hér beinist athyglin fyrst og fremst að þremur þeirra; (i) gæðum vegspottans í víðum skilningi sem við táknum með k , (ii) umferðinni, þ.e. fjölda farartækja á veginum, n , og (iii) takmörkunum á ferðahraða, $smax$. Þetta má rita formlega sem líkinguna:

$$(2) \quad s = \min[S(n, k), smax],$$

þar sem $S(n, k)$ er svokallað hraðafall, þ.e. sá hraði sem vegfarandi kysi að ferðast á við þær aðstæður sem fyrir hendi eru ef hann væri ekki bundinn af leyfilegum hámarkshraða. Hægri hlið (2) merkir að hraðinn er það sem lægra er, hraðafallið, $S(n, k)$, eða leyfilegur hámarkshraði.

Augljóst virðist að hraðafallið hafi eiginleikana $S(n, k) \geq 0$, $S_n \leq 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} S = 0$ og $S_k \geq 0$.³ Með öðrum orðum hraðinn getur aldrei orðið neikvæður, getur ekki vaxið með umferð, verður enginn þegar fjöldi farartækja á vegspottanum verður nægilega mikill og getur ekki minnkað þegar vegurinn er bættur. Þá virðist óhætt að gera ráð fyrir að hraðafallið sé hvelft (e. concave). Með öðrum orðum; því meiri sem umferðin er þeim mun hraðar fellur meðalhraðinn með aukinni umferð og því meiri sem gæði vegspottans eru þeim mun minni hraðaaukning fæst með auknum gæðum.

Þessum eiginleikum hraðafallsins er lýst með myndrænum hætti í mynd 2.1. Það umferðarmagn sem kemur umferðarhraða niður í núll, þ.e. veldur algerri umferðarstíflu er kallað $ncrit$ á myndinni.



Séu hraðatakmarkanir bindandi, mynda þær efri mörk á meðalhraðann sem myndrænt skera ofan af mögulegum hraða eins og lýst er með punktalínunum í mynd 2.1. Augljóst er af mynd 2.1 b. að séu hraðatakmarkanir bindandi munu vegabætur ekki auka umferðarhraða.

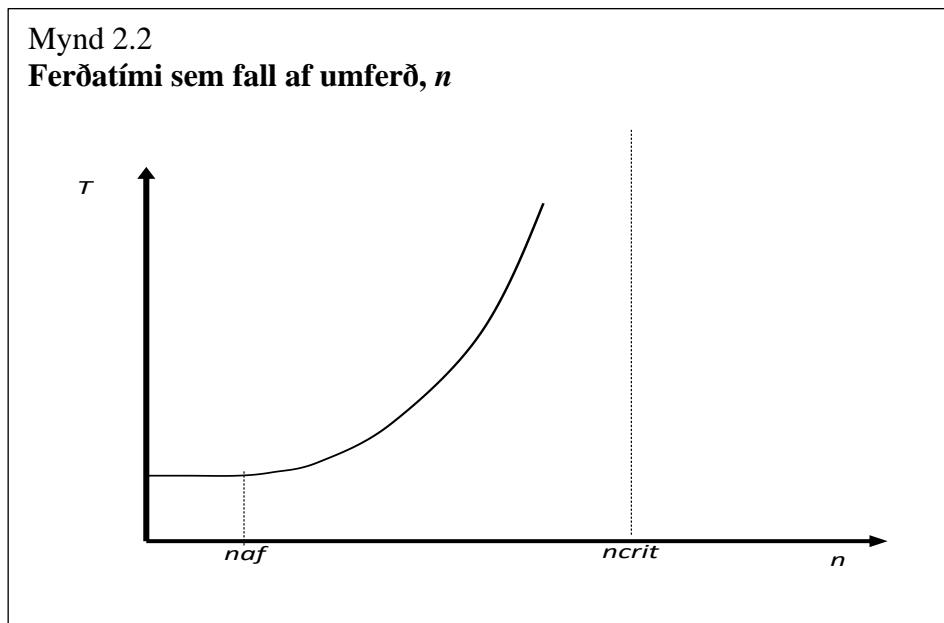
Til að einfalda greininguna gerum við hér eftir ráð fyrir að $smax$ sé ekki bindandi nema annað sé tekið fram.

³ Hér sem annars staðar í þessari skýrslu (nema annað sé tekið fram) merkja lágskriftirnar S_n og S_k afleiður af fallinu S með tilliti til viðkomandi breyta

Líking (1) og hraðafallið skýrgreina ferðátíma sem fallið:

$$(3) \quad T(n, k) \equiv \frac{1}{S(n, k)}.$$

Samkvæmt ofangreindum eiginleikum hraðafallsins er auðvelt að sýna fram á að tímafallið $T(n, k) > 0$ og sömuleiðis afleiður þess, þ.e. $T_n, T_{nn} > 0$. Jafnframt stefnir ferðatíminn á óendanlegt þegar umferð stefnir á n_{crit} , þ.e. $\lim_{n \rightarrow n_{crit}} T(n, k) \rightarrow \infty$. Myndræna lýsingu á þessu tímafalli í rúmi ferðátíma og umferðar er að finna í mynd 2.2.



Mynd 2.2. er dregin fyrir tiltekin umferðarmannvirki, k . Séu þau bætt, lækkar bugðan og teygist til hægri.

Að gefnum umferðarmannvirkjum sýnir mynd 2.2 að ferðatími vex lítið með umferð upp að vissu magni umferðar. Það umferðarmagn sem kalla má afkastagetu viðkomandi umferðarmannvirkja er merkt n_{af} í mynd 2.2. Eftir að umferð nær n_{af} vex ferðatími með umferð og æ hraðar sem umferðarmagnnið meira. Þetta er algildur og afar mikilvægur eiginleiki ferðatímafallsins. Von bráðar kemur að því að tiltölulega lítil aukning umferðar verður til þess að auka ferðátíma mjög mikið með tilheyrandi þjóðhagslegum kostnaði. Ekki þarf að orðlengja það, að skynsamlegar fjárfestingar í umferðarmannvirkjum forðast þá stöðu sem heitan eldinn.

Afköst vegspottans er sá fjöldi vegfaranda sem kemst eftir veginum á tímaeiningu. Þessi afköst má með hjálp (3) rita sem:

$$(4) \quad Afk(n, k) = \frac{n}{T(n, k)} = n \cdot S(n, k)$$

Auðvelt er að ganga úr skugga um að þetta afkastafall er hvelft⁴ og hefur hámark. Hámarkið er við þá umferð, þ.e. n , sem leysir eftirfarandi jöfnu:

$$(5) \quad S(n, k) + n \cdot S_n(n, k) = S(n, k) \cdot (1 + E(s, n)) = 0,$$

þar sem $E(s, n)$ er svokölluð teygni hraða með tilliti til umferðar, n .⁵

Þar sem hraðinn, $S(n, k)$, getur ekki verið núll við mestu afkastagetu vegspottans eru mestu afköst vegspottans þar sem teygni ferðahraða með tilliti til fjölda fartækja er -1 , þ.e. ferðahraði minnkar um 1% þegar fjöldi faratækja vex um 1%. Ekki þarf mikla umhugsun til að sjá að svona hlýtur þetta að vera.

Mikilvægt er að átta sig á að sú umferð, n , sem hámarkar afköst vegarins hefur ekkert með hagkvæmni að gera. Auðvelt er að sýna fram á svo framalega sem ferðatími er kostnaðarsamur (dregur úr nytjum) er hagkvæmasta umferð minni og því ferðahraði meiri og ferðatími styttri en nemur þeirri umferð sem nemur mestu afkastagetu vegarins.⁶

Heildarferðatími er:

$$(6) \quad T_{tot}(n, k) = n \cdot T(n, k)$$

Heildarferðatími vex mjög hratt með fjölda vegfarenda eftir að þeir ná tölunni *naf*. Það er vegna þess að tímafallið sem vex hratt eins og mynd 2.2. sýnir er margfaldað með öðru vaxandi falli, n . Formlega samhengið milli heildarferðatíma og fjölda vegfarenda (umferðar) má rita::

$$(7) \quad \frac{\partial \ln T_{tot}(n, k)}{\partial \ln n} = 1 + \frac{\partial \ln T(n, k)}{\partial \ln n} \equiv 1 + E(T, n),$$

þar sem $E(T, n)$ er teygni ferðatíma hvers vegfaranda með tilliti til fjölda vegfarenda, þ.e. teygni fallsins í mynd 2.2. Teygni heildarferðtíma er þessi teygni að viðbættum einum, sem sagt meiri teygni og þar með meiri halli upp á við.

Í daglegu tali er gjarnan talaðu ferðatafir eða tafatíma fremur en ferðatíma. Ferðatafir má skýrgreina sem raunverulegur ferðatími að frádregnum minnsta mögulega ferðatíma. Þ.e.

$$(8) \quad TT(n, k) \equiv \frac{1}{S(n, k)} - \frac{1}{S(0, k)}.$$

Þar sem $S(0, k)$ er fasti, er lögun umferðartafa-fallsins í aðalatriðum eins og tímafallsins.

⁴ Önnur afleiða fallsins er: $\partial^2 Afk / \partial n^2 = 2 \cdot S_n + n \cdot S_{nn}$, en bæði S_n og S_{nn} eru neikvæðar stærðir samkvæmt forsendum um hraðafallið hér að framan.

⁵ Teygni x m.t.t. y er hlutfallsleg breyting í x þegar y eykst um 1%, þ.e. $E(x, y) \equiv d \ln(x) / d \ln(y)$, þar sem táknið 'd' merkir örlitla breytingu.

⁶ Eftir því sem umferð er meiri þeim mun lengri er ferðatími og þar með kostnaðurinn vegna ferðatímans. Því er hagkvæmasta umferð lægri en sú umferð sem hámarkar afköst vegarins.

2.2 Tímavirði: Fræðileg grundvallaratriði⁷

Tími hvers og eins er takmarkaður. Því hefur hann virði (e. value). Hann hefur virði í þeim skilningi að viðkomandi aðilar myndu vilja greiða fjárhæð (ekki nauðsynlega póstítífa) fyrir meiri tíma (innan dags, árs eða yfir ævina).

Einstaklingar (heimili) ráðstafa fyrirbyggjandi tíma til mismunandi nota í því skyni að hámarka velsæld sína. Eins og annað hagrænt virði er virði tíma sem varið er á tiltekinn hátt a.m.k. ábatinn af því að nota hann til annarra þarfa. Hafi einstaklingurinn frjálssar hendur um ráðstöfun tíma síns er jaðarábati hans af hinum mismunandi notum tímans þau sömu. Við slíkar aðstæður má því draga ályktun um hið sameiginlega tímavirði með því að skoða virði einna tiltekinna nota.

Þessar niðurstöður um tímavirði má setja fram með formlegum hætti sem hér segir:

Allir einstaklingur hafi takmarkaðan tíma, T . Þessum tíma geta þeir varið á mismunandi vegu. Þeir geta ráðstafað honum til vinnu sem við táknum með t_v , frístundir sem við táknum með t_r , og ferðir sem við táknum með t_f .

Ástæðurnar fyrir því að einstaklingar kys að ferðast eru margvíslegar m.a. að með því að ferðast geta þeir aukið tekjur sínar, náð í staðbundnar neysluvörur eða fengið neysluvörur á hagstæðara verði auk þess sem ferðalagið sjálft getur verið hluti af eftirsóknarverðri neyslu. Ferðist einstaklingur, getur hann orðið fyrir umferðartöfum sem við táknum með t . Lengd umferðatafanna má mæla sem hlutfall af ferðatíma. Táknum hlutfallið með ϕ , þá er:

$$(9) \quad t_t = \phi \cdot t_f,$$

Að sjálfsgöðu $\phi \in [0, \infty]$.

Ofangreinda tímatakmörkunina í heild má þá rita sem:

$$(10) \quad T = t_v + t_r + t_f + \phi \cdot t_f.$$

Samkvæmt viðtekinni hagfræði má gera ráð fyrir að hver einstaklingur hafi nytjafall (e. utility function) sem ráðist af magni neyslu, x , og ráðstöfun tíma til mismunandi nota. Ritum þetta fall

$$(11) \quad U(x, t_v, t_r, t_f, \phi \cdot t_f).$$

Á þessu stigi þurfum við einungis að gera ráð fyrir að þetta nytjafall sé diffranlegt og hvelft. Í hagfræði er hins vegar jafnan gengið að því vísu að nytjafallið sé vaxandi í x og t_r .

⁷ Þessi kafli byggir á og er í samræmi við viðtekna hagfræði á þessu sviði, Sjá t.d. DeSerpa 1971, Layard og Glaister 1994. MVA og fél. 1994. og Small 2012.

Neysla takmarkast af skilyrðinu:

$$(12) \quad y + w \cdot t_v - p \cdot x = 0,$$

þar sem w vinnulaun á tímaeiningu og p einingaverð neysluvara. y (sem gæti verið núll) er fyrirlliggjandi fé. Það er haft með í (4) einungis í því skyni að skýra skuggavirði tekna.

Einstaklingurinn leitast við velja neyslu og ráðstafa tíma sínum innan þeirra marka sem hliðarskilyrði (2) og (4) setja þannig að notagildi hans hámarkað. Formlega leitast hann við að

$$(I) \quad \underset{x, t_v, t_r, t_f}{\text{Hám}} U(x, t_v, t_r, t_f, \phi \cdot t_f), \text{ þ.a. skilyrði (10) og (12) halda.}$$

Til að leysa þetta vandamál er hentugt að setja upp Lagrange-fallið (sjá t.d. Intriligator 1971)

$$(13) \quad L = U(x, t_v, t_r, t_f, \phi \cdot t_f) + \lambda \cdot (y + w \cdot t_v - p \cdot x) + \mu \cdot (T - t_v - t_r - t_f - \phi \cdot t_f),$$

þar sem Lagrange-margfaldararnir λ og μ mæla skuggavirði annars vegar tekna og hins vegar tíma í lausn hámröknarvandamálsins.

Varðandi Lagrange-fallið er mikilvægt að gera sér grein fyrir tvennu:

- Ef einstaklingurinn myndi kjósa meiri tekjur og tíma eru skuggavirðin λ og μ jákvæð, þ.e. $\lambda, \mu > 0$. (Kuhn-Tucker 1951).
- Þar sem svigastærðirnar við Lagrange-margfaldarana eru núll er Lagrange-fallið ávallt jafnt nytjafallinu.

Í því sem á eftir fer er skuggavirði tekna, λ , sett jafnt einum, þ.e. $\lambda=1$. Þetta jafngildir því að margfalda nytjafallið (og þar með Lagrange-fallið) með $1/\lambda$. Slík skölun er ávallt heimil þar sem nytjaföllin eru aðeins skýrgreind upp að margföldunarstuðli (eru ekki „cardinal“, sjá nánar Varian 1984).

Lausn hámröknarvandamálsins, (I), verður m.a. að fullnægja eftirtöldum skilyrðum sem hjálplegt er að hafa í huga:

$$(I.1) \quad U_x - p = 0,$$

$$(I.2) \quad U_{t_v} + w - \mu = 0,$$

$$(I.3) \quad U_{t_r} - \mu = 0,$$

$$(I.4) \quad U_{t_f} + U_{t_f} \cdot \phi - \mu \cdot (1 + \phi) = 0.$$

Nauðsynleg skilyrði (I.2)-(I.4) fela í sér grunnlögmál um hagkvæmustu ráðstöfun tíma. Samkvæmt skilyrði (I.3) skal auka frítíma þar til jaðarnotin af honum eru jöfn skuggavirði tíma, μ . Skuggavirði tíma er m.ö.o. jafnt jaðarnotum frítíma. Skilyrði (I.4) um hagkvæmasta ferðatíma er það sama að því viðbættu að taka þarf tillit til þess að ferðatími bætir einnig við tafatíma sem hækkar tímakostnaðinn við ferðirnar. Afleiðing þessara tafa er samkvæmt (I.4)

sú að hagkvæmt er að draga út þeim tíma sem varið er í ferðir.⁸ Skilyrði (I.2) um hagkvæmasta vinnutíma endurspeglar einnig sama lögmál að viðbættu því veigamikla atriði að það kemur greiðsla, vinnulaun, fyrir vinnutímamann. Samkvæmt (I.2) skal sem sagt auka vinnutíma þar til jaðarátatinn af honum (sem hæglega getur verið neikvæður) að viðbættum laununum, w , er jafnt skuggavirði tíma.

Samkvæmt ofangreindu eru því eftirfarandi líkingar fyrir skuggavirði tíma, μ , allar jafngildar:

$$(14) \quad \mu = U_{t_r} = U_{t_v} + w = (U_{t_f} + U_{t_i} \cdot \phi) \cdot \left(\frac{1}{1 + \phi} \right).$$

Hvaða líking er notuð til að meta skuggavirði tíma ræðst því öðru fremur af fyrirbyggjandi gögnum. Til að mynda er hugsanlegt að fyrir liggi mat á vinnulaunum, w . Skuggavirði tíma er þá $\mu = U_{t_v} + w$. Sé jaðarnotagildi vinnu núll er þá skuggavirði tíma w , en minna en w ef jaðarnotagildi vinnu er neikvætt og öfugt.

Látum nú L^* tákna hámarkaða Lagrange-fallið, þ.e. gildi þess þar sem stýribreyturnar, x , t_v , t_r og t_f taka þau gildi sem leysa vandamál (I). Þá er unnt að sýna fram á (t.d. með hjálp hinnar velþekktu umslagssetningar (e. envelope theorem) sjá nánar Varian 1984 eða viðauka 2.A) að skuggavirði tafahlutfallsins, ϕ , er

$$(15) \quad \frac{\partial L^*}{\partial \phi} \equiv \frac{\partial U(x^*, t_v^*, t_r^*, t_f^*, \phi \cdot t_f^*)}{\partial \phi} = (U_{t_i} - \mu) \cdot t_f.$$

En samkvæmt (I.2) er $\mu = U_{t_v} + w$. Því má endurrita (15) sem:

$$(16) \quad \frac{\partial L^*}{\partial \phi} = (U_{t_i} - U_{t_v} - w) \cdot t_f.$$

Til að skilja líkingu (16) betur gerum til bráðabirgða ráð fyrir að $U_{t_i} - U_{t_v} = 0$. Þá verður (16)

$$(16.1) \quad \frac{\partial L^*}{\partial \phi} = -w \cdot t_f.$$

Með öðrum orðum skuggavirði tafahlutfallsins er jafnt margfeldi vinnulauna og ferðatíma. Þetta skuggavirði er jafnframt neikvætt sem sýnir að tafatíminn er kostnaður en ekki ábati.

Kostnaður við tiltekna tafir, þ.e. sú upphæð sem viðkomandi einstaklingur myndi vilja greiða fyrir að losna við þær er þá:

$$(16.2) \quad TC = w \cdot t_f \cdot \phi = w \cdot t_i,$$

þar sem t_i er samkvæmt líkingu (1) tafatíminn.

⁸ Þar sem nyjafallið er hvelft umhverfis bestu lausn mun afleiðan U_{t_f} vaxa með minni ferðatíma.

Líking (16.2) er sú sem gjarnan hefur verið notuð til að meta kostnað við umferðartafir. Líking (16) sýnir hins vegar að hún er einföldun. Við launin þarf að bæta stærðinni $U_{t_v} - U_{t_i}$ sem er mismunurinn á jaðarnotagildi tafa og jaðarnotagildi vinnu. Jaðarnotagildi vinnu skiptir hér máli vegna þess að sá tími sem fer í umferðartafir verður ekki notaður til vinnu.⁹

Ganga má að því vísu að jaðarnotagildi tafa sé neikvætt; allir virðast forðast tafir. Jafnframt bendir margt til þess að jaðarnotagildi umferðartafa sé mjög neikvætt og hið neikvæða jaðarnotagildi vaxi hratt með auknum töfum. Jaðarnotagildi umferðartafa er því til að auka tafakostnað umfram það sem mælt er í launum.

Hagfræðirannsóknir benda til þess að jaðarnotagildi vinnu sé einnig að jafnaði neikvætt. Þetta á a.m.k. við um þann jaðarvinnutíma sem aðilar krefjast launa fyrir. Samkvæmt (8) verður því jaðarnotagildi vinnu til að minnka skuggavirði umferðartafa.

Heildaráhrif stærðarinnar $U_{t_i} - U_{t_v}$ í líkingu (16) fara því eftir hvort sé neikvæðara jaðarnotagildi umferðartafa eða jaðarnotagildi vinnu. Ef hið fyrra er neikvæðara, vanmeta vinnulaun virði umferðartafa. Ef hið síðara er neikvæðara ofmeta þau virði umferðartafa.

2.3 Tafakostnaður

Í kafla 2.1 var sá tími sem það tekur að aka tiltekna vegalengd skýrgreindur sem fallið:

$$T(n, k),$$

þar sem n er fjölda vegfaranda og k gæði vegarins. Þar var jafnframt útskýrt að ferðatíminn væri vaxandi í n og minnkandi í k og kúpt í báðum breytum. Jafnframt var sýnt fram á að við eitthvað tiltekið fast k myndi $T(n, k) \rightarrow \infty$, þegar n stefndi á viss efri mörk, *ncrit*.

Í kafla 2.2 var sýnt fram á (sjá líkingu (16)) að virði tafatíma væri

$$(17) \quad v = w + (U_{t_v} - U_{t_i}),$$

þar sem w er vinnulaun, U_{t_v} jaðarnytjar vinnutíma og U_{t_i} jaðarnytjar tafatíma.¹⁰

Tafakostnaður einstaklings er þá:

$$TC(n, k) = v \cdot T(n, k)$$

Og tafakostnaður í heild:

$$(18) \quad TC_{tot}(n, k) = v \cdot n \cdot T(n, k).$$

⁹ Líking (I.3) sýnir að jaðarnotagildi frítíma skiptir hér einnig máli, en þar sem einfalt samband er á milli jaðarnotagildis vinnu og frítíma samkvæmt (I.2) og I.3) kemur hvort í stað hins.

¹⁰ Hvor jaðarnytin er mæld í peningaeiningum.

Þar sem v er jákvæður fasti er lögun tímakostnaðarfallanna sú saman og samsvarandi tímafalla í kafla 2.1.

Viss hefði er fyrir því í umferðarfræðum (sjá t.d. MVA et al. 1994 og Cowi og Mannvit 2020) að gera ráð fyrir að $(U_{t_v} - U_{t_s}) = 0$ og meta virði tafatíma sem $v = w$.¹¹

2.4 Fjárfestingar í vegabótum

Umferðartími er kostnaðarsamur vegna verðmætis tíma. Umferðartíma má stytta (og ferðalög jafnframt gerð öruggari) með fjárfestingum í vegabótum. Slíkar fjárfestingar eru hins vegar líka kostnaðarsamar. Því er spurning hversu mikið eigi að fjárfesta í vegabótum. Í þessum kafla verður gerð grein fyrir nokkrum meginreglum hvað þetta snertir.

2.4.1 Hagkvæmstu fjárfestingar í vegabótum: Grunnfræði

Fjárfestingar skapa fjármuni sem rýrna smám saman en endast þó í einhvern tíma. Einfalt lögmál um þessa þróun fjármuna í samfelldum tíma er:¹²

$$(19) \quad \dot{k}(t) = i(t) - \delta \cdot k(t),$$

þar sem $k(t)$ eru fjármunirnir á tíma t , $\dot{k}(t)$ andartaksbreyting þeirra, $i(t)$ fjárfesting í nýjum fjármunum og δ rýrnunarhlutfall fjármuna á hverju andartaki.

Líking (1) og önnur þróunarlögmál fjármuna sýnir að val á fjárfestingum er óhjákvæmilega tímatengt (e. dynamic) vandamál.

Látum nú einingarverð ferðatíma vera w og fjárfestinga í vegabótum vera s . Þá er heildarkostnaður samfélagsins vegna ferðatíma og fjárfestinga í vegabótum á hverjum tíma:¹³

$$(20) \quad C_{tot}(n, k, i) = n \cdot w \cdot T(n, k) + s \cdot i,$$

þar sem n er sem fyrr fjöldi vegfarenda og fallið $T(n, k)$ ferðatími. Miðað við fyrri forsendur um lögun hraðafallins, $S(n, k)$, og þar með tímafallsins í kafla 2.1 er þetta kostnaðarfall vaxandi í n en lækkandi í k og kúpt í báðum þessum breytum.

Gerum nú til bráðabirgða ráð fyrir að n sé ytri stærð (þ.e. þróist óháð k). Hagkvæmasta fjárfesting er þá lausnin á eftirfarandi hámarksvandamáli:¹⁴

¹¹ Óhætt er að gera ráð fyrir að jaðarnyt af tafatíma, U_{t_s} , sé neikvæð. Sé hún jafnneikvæð og jaðarnyt vinnutíma verður $(U_{t_v} - U_{t_s}) = 0$. Sé jaðarnyt af tafatíma hins vegar neikvæðari en jaðarnyt af vinnutíma, sem líklegt er, verður $(U_{t_v} - U_{t_s}) > 0$ og vinnulaun vanmeta kostnaðinn við umferðartafir. Þetta snýst hins vegar við ef jaðarnyt vinnutíma er neikvæðari en jaðarnyt tafatíma..

¹² Flóknari þróunarlögmál fyrir fjármuni breyta engu um meginlögmál hagkvæmstu fjárfestinga.

¹³ Auðvelt er að bæta áhættu eða ferðaöryggi við þessa líkingu.

¹⁴ Takið eftir að í stað þess að lágmarka samfélagskostnaðinn er hér neikvæður kostnaðurinn hámarkaður sem er auðvitað það sama.

II. $\underset{\{i\}}{Hám} V(k(0), 0) = \int_0^\infty -C_{tot}(n, k, i) \cdot e^{-r \cdot t} dt$, þ.a. $i(t) \geq 0$, öll t , $k(0)$ =gefið og líking (1) haldi.

Samkvæmt hámarksreglu Pontryagin's (sjá t.d. Pontryagin og fél 1962, Intriligator 1971) eru nauðsynleg skilyrði fyrir því að leysa þetta vandamál m.a.:

II.1 Ef $s = \lambda \Rightarrow i(t) = \delta \cdot k(t)$; ef $s > \lambda \Rightarrow i(t) = 0$; ef $s < \lambda \Rightarrow i(t) \rightarrow \infty$.

II.2 $\dot{\lambda} - r \cdot \lambda = n \cdot w \cdot T_k(n, k) + \lambda \cdot \delta$,

þar sem λ er skuggavirði fjármuna. Nánar tiltekið mælir λ þann ávinning (vegna tímasparnaðar) sem næðist ef vegið væru aðeins betri. Rétt er að vekja athygli á að þetta skuggavirði lækkar með magni fjármuna, þ.e. gæðum vegarins, að öðru óbreyttu.

Skilyrði II.1 er hagkvæmasta fjárfestingarreglan. Samkvæmt henni skal ekkert fjárfesta ef skuggavirði vegabóta er lægra en einingarverð fjárfestinga, þ.e. s . Sé skuggavirðið hins vegar hærra en einingarverð fjármuna skal fjárfesta eins hratt og unnt er þar til skuggavirðið er orðið jafnt einingarverði fjárfestinga.

Frá hagnýtu sjónarmiði er jafnvægisferillinn, þar sem $\lambda = s$ áhugaverðastur, enda er hann varanlegur ef á annað borð er fylgt hagkvæmustu fjárfestingarreglu. Á þeim ferli gildir reglan:

$$(21) \quad \frac{-n \cdot w \cdot T_k(n, k)}{(r + \delta)} = s.$$

Með öðrum orðum núvirtur samfélagslegur ávinningur af fjárfestingu (vinstri hlið (21)) skal vera jafn einingarverði fjárfestinga.

Á þessum jafnvægisferli verður fjárfesting að vera:

$$(22) \quad i(t) = \delta \cdot k - \frac{\dot{n}}{n} \cdot \left(\frac{T_k + n \cdot T_{kn}}{T_{kk}} \right).$$

Sé umferðarmagn ekki að breytast er $\dot{n} = 0$, síðasti liðurinn á hægri hlið hverfur og fjárfesting verður þá aðeins viðhaldsfjárfestingin $\delta \cdot n$. fari umferðarmagn hins vegar vaxandi er $\dot{n} > 0$ og fjárfestingin verður umfram viðhaldsfjárfestingu (sviginn á hægri hlið (4) er neikvæður)

Líkingu (21) má leysa fyrir hagkvæmustu fjármuni (vegagæði), k^* , á hverjum tíma. Þá lausn má rita:

$$k^* = K(n, w, s, r, \delta).$$

Miðað við lögun ferðatímafallsins $T(n, k)$, sem rakin var í kafla 2.1, er auðvelt að staðfesta að $K_n > 0$, $K_w > 0$, $K_s < 0$, $K_r < 0$ og $K_\delta < 0$. M.ö.o. ef fleiri fara um veginn eða tímavirði hækka á veginn. að vera betri. Ef á hinn bóginn fjárfestingarkostnaður, ávöxtunarkrafa eða

rýrnunarhlutfall fjármuna hækka er lakari vegur hagkvæmari en ella. Þessar niðurstöður eru auðvitað í samræmi við það sem flestir myndu giska á fyrirfram.

2.4.2 Ósamfelldar fjárfestingar

Fjárfestingar í umferðarmannvirkjum (vegabótum) geta sjaldan verið samfelldar eins og greiningin í 2.4.1 gerir ráð fyrir. Þvert á móti koma slíkar fjárfestingar yfirleitt í tiltölulega stórum bútum eða stykkjum. Við táknum slíkar fjárfestingar með stóra bókstafnum I og samsvarandi breytingu í fjármunum sem $\Delta k(t) \equiv k(t-1)+I(t)$.

Nú er núvirði tímakostnaðar af umferð á tilteknum vegkafla miðað við tiltekin veggæði, $k(0)$:

$$V(k(0)) = \int_0^{\infty} C_{tot}(n, k(0), i) \cdot e^{-r \cdot t} dt,$$

en með fjárfestingunni $I(0)$ er núvirðið:

$$V(k(0) + I(0)) = \int_0^{\infty} C_{tot}(n, k(0) + I(0), i) \cdot e^{-r \cdot t} dt$$

Ávinningurinn af fjárfestingunni $I(0)$ er því:

$$V(k(0)) - V(k(0) + I(0)) - s \cdot I(0),$$

þar sem $s \cdot I(0)$ er kostnaðurinn við fjárfestinguna.

Hagkvæm fjárfestingarregla er því:

(23) Ef $V(k(0)) - V(k(0) + I(0)) > s \cdot I(0) \Rightarrow$ ráðast í fjárfestinguna

Ef $V(k(0)) - V(k(0) + I(0)) < s \cdot I(0) \Rightarrow$ ekki fjárfesta.

Þetta er meginreglan. Frekari útvíkkningar í raunsæisátt t.d. með því að gera ráð fyrir að fjárfestingin taki tíma og trufla umferð á fjárfestingartíma eru auðveldar, en flækja algebruna og bæta engu umtalsverðu við meginregluna í (23).

2.4.3 Fjöldi vegfarenda er innri breyta

Gerum nú ráð fyrir að $n = N(T(n, k), \dots)$, þ.e. ferðatími hafi áhrif á hvað margir kjósa að leggja í ferðina. Við drögum sambandið milli n og k saman í fallið:

$$(24) \quad n = NN(k)$$

Óhætt er að gera ráð fyrir að $N_T < 0$, þ.e. færri leggi í ferðina ef ferðatíminn lengist. Þar með leiðir af lögun $T(n, k)$ -fallsins að $NN_k > 0$, þ.e. fleiri fara um veginn ef hann er bættur.

Til að firra misskilningi er ástæða til að vekja athygli á því að þó ekki væri nema vegna þess að fjöldi einstaklinga er takmarkaður hlýtur afleiðan N_k að stefna á núll þegar k vex. Það er m.ö.o. skýr efri mörk á aukningu umferðar vegna vegabóta.

Takið jafnframt eftir því að þótt umferð kunnist að vaxa með vegabótum hlýtur ferðatími einstakra vegfarenda ávallt að minnka. Ástæðan er einföld. Ef svo væri ekki myndu ekki fleiri vegfarendur fara um veginn. Á hinn bóginn er hugsanlegt að heildartafir ykust, ef nægilega margir nýir ökumenn myndu ferðast um vegkaflann.

Takið að lokum eftir því að þegar umferð er innri breyta en ekki bara gefin ytri breyta er nauðsynlegt að taka tillit til þess ávinnings sem vegfarendur hafa af ferð um veginn. Sé það ekki gert og aðeins horft til kostnaðar af umferð væri sá kostnaður lágmarkaðu með því fjárfesta ekkert í veginum og hafa enga um ferð um hann. Ritum hið samfélagslega ábatafall af umferð um veginn sem

$$(25) \quad V(N(k)),$$

sem er auðvitað vaxandi í n og væntanlega hvelft.

Hagkvæmasta fjárfesting er þá lausn á eftirfarandi hámmörkunarvandamáli:

$$\text{III.} \quad \underset{\{i\}}{\text{Hám}} \int_0^{\infty} (V(N(k)) - w \cdot N(k) \cdot T(N(k), k) - s \cdot i) \cdot e^{-r \cdot t} dt,$$

þ.a. $i(t) \geq 0$, öll t , $k(0) = \text{gefið}$ og líking (1) haldi.

Með því að ráðgast við hámmörkunarreglu Pontryagin's er unnt að finna eftirfarandi nauðsynlegt skilyrði fyrir hagkvæmustu fjárfestingu:

$$(26) \quad \frac{-n \cdot w \cdot T_k(n, k) + (V_n - w \cdot T - w \cdot n \cdot T_n) \cdot N_k}{(r + \delta)} = s$$

Síðari liðurinn á vinstri hlið líkingar (26), þ.e. $\frac{(V_n - w \cdot T - w \cdot n \cdot T_n) \cdot N_k}{(r + \delta)}$ felur í sér viðbót við

fjárfestingarreglu (21) þegar n er fall af veggæðum. Takið eftir að þessi liður verður núll þegar $N_k = 0$. Þessi viðbót getur bæði verið jákvæð, þ.e. ýtt undir meiri fjárfestingu en ella, eða neikvæð, þ.e. minnkað hagkvæmustu fjárfestingu miðað við (21). Liðurinn V_n sýnir ávinninginn af því að fleiri geta nú nýtt sér að ferðast eftir veginum. Sá liður ýtir því undir meiri fjárfestingu en þegar n er óháð gæðum vegarins, þ.e. fjárfestingu samkvæmt líkingu (21). Liðurinn $w \cdot T$ mælir aukinn tafakostnað vegna þess að fleiri fara nú um veginn og liðurinn $w \cdot n \cdot T_n$ mælir aukinn tafakostnað í heild vegna þess að tafatími á mann vex með aukinni umferð.

3. Mat á tafatíma

Tafatíma í ferð má skoða sem ferðatíma umfram þann tíma sem ferðamáti með hæfilegu ferðaöryggi leyfa. Í bifreiðaumferð má rekja þennan tafatíma til a.m.k. þriggja þátta:

- (i) Ófullkominna umferðarmannvirkja, þ.m.t. óþarfa hraðahindranir og umferðarljós.
- (ii) Umferðarreglna sem takmarka hraða umfram það sem nauðsynlegt er.
- (iii) Umferðartruflunar, þ.e. hraðaminnkunar vegna fjölda faratækja á veginum.

Ljóst er að þessir þættir spila saman. Til að mynda er augljóst að slök umferðarmannvirki tefja umferð og eru þannig líkleg til að auka umferðartruflanir (liður (iii)) en bætt umferðarmannvirki eru á hinn bóginn líkleg til draga úr umferðartruflunum. Þá virðist ekki langsótt að ófullkomin umferðarmannvirki og þar með umferðartruflanir geti leitt til þess að takmarkandi umferðarreglur séu settar.

Hér á eftir er gerð grein fyrir þrenns konar mati á tafatíma í umferð á höfuðborgarsvæðinu. Í fyrsta lagi er um að ræða mat sem unnið hefur verið á grundvelli mælinga bandaríska leiðsagnarfyrtækisins TomTom á umferð á höfuðborgarsvæðinu. Í öðru lagi er mat sem byggt er á niðurstöðum könnunar meðal höfuðborgarbúa sjálfra á þeim umferðartöfum sem þeir telja sig verða fyrir. Í þriðja lagi er mat á grundvelli áætlaðra meðaltafa í hverri akstursferð. Þrátt fyrir mismunandi aðferðarfræði og forsendur eru niðurstöður þessara athugana nokkuð áþekkar. Þær gefa allar til kynna að íbúar höfuðborgarsvæðisins verði daglega fyrir heildartöfum í umferð sem geti samanlagt gætu numið 30 til 65 þús. klst. á hverjum virkum degi.

3.1 Mat á umferðartöfum á grundvelli TomTom umferðarmælinga

Upplýsingar um dreifingu umferðar og umferðartafir fyrir fjölda þéttbýlisstaða í heiminum má finna á vefsíðu leiðsagnarfyrtækisins TomTom.¹⁵ Á meðal þeirra þéttbýlisstaða sem gögn eru birt um er höfuðborgarsvæðið á Íslandi. Gögn þau sem hér er byggt á eru fyrir árið 2019 sem er síðasta heila árið áður en Covid-faraldurinn fór að hafa áhrif á samfélagið.

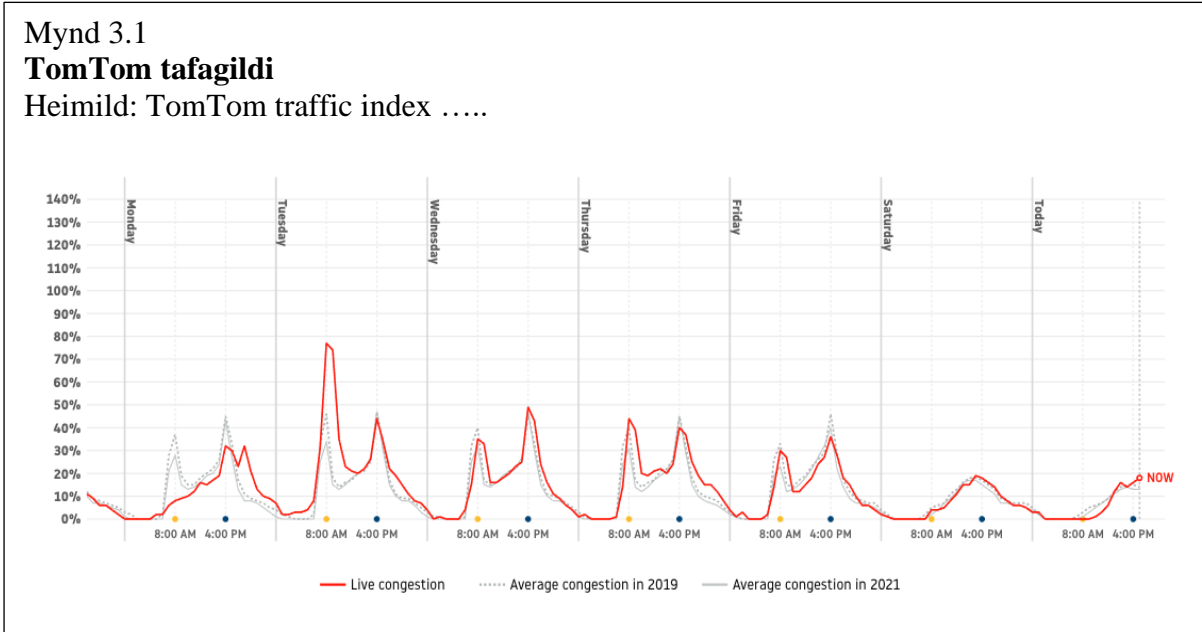
TomTom notar GPS „particle tracking“ tækni til að meta dreifingu umferðar í vegkerfinu og umferðarhraða. Umferðartafir eru metnar sem ferðatími í umferðinni umfram það sem gerst hefði í óhindraðri umferð, þ.e. svokölluðu frjálstu flæði. Á þeim grundvelli er reiknað svokallað tafagildi sem hlutfallstala ferðatíma umfram það sem vera ætti í frjálstu flæði.¹⁶ Mikilvægt er að átta sig á því að frjálst flæði er skýrgreint sem umferðarhraði þegar önnur farartæki eru ekki að valda vegfaranda töfum. TomTom tafagildið tekur því ekki tillit til umferðartafa sem eru vegna illa hannaðra eða á annan hátt lélegra umferðarmannvirkja eða hraðatakmarkana svo framalega sem farartæki eru ekki að tefja hvort fyrir öðru.

Áður en lengra er haldið er rétt er að vekja athygli á því að TomTom leiðsagnartæki eru ekki mjög algeng í íslenskum bifreiðum. Þau eru í leigubílum Hreyfils og Tom Tom notar upplýsingar frá þeim tækjum með sérstöku leyfi til að meta stöðu umferðar. Þetta gerir hin mældu TomTom gildi óreiðanlegri sem mælingu umferðartafir í heild en ella væri.

¹⁵ tomtom.com/en_gb/traffic-index/reykjavik-traffic

¹⁶ Umferðartöf samkvæmt TomTom-nálgun er því $taf = Tom \cdot tff$, þar sem Tom táknar TomTom tafagildi og tff ferðatíma í frjálstu flæði.

Í mynd 3.1 sýnir dæmigerða tímaröð fyrir TomTom mælingar á umferðartöfum á höfuðborgarsvæðinu í eina viku. Mælingarnar eru í febrúar árið 2022 og sýna meðaltal TomTom tafagilda á hverri klukkustund. Topparnir yrðu ugglaut talsvert hærrí miðað við botnana ef mælingarnar væru með meiri tíðni t.d. á mínútuþrunni.



Eftirtektarverðast við tímaröðina í mynd 3.1 eru hinar miklu sveiflur í tafagildum yfir sólarhringinn. Á virkum dögum eru þessir toppar kerfisbundið milli 8 og 10 á morgnana og 16-18 síðdegis líkt og margir kannast við af eigin reynslu. Eins og myndi 3.1 sýnir er það fyrst á fremst á þessum tímum sem tafagildi TomTom rjúka upp. Yfir blánóttina, svona frá upp úr 1 eftir miðnætti fram undir 7 eru tafagildi TomTom hins vegar nálægt núlli. Með öðrum orðum á þessum tímum lítur TomTom svo á að eigi sér stað hið frjálsta flæði í umferðinni sem fyrr er nefnt. Einnig er vert að taka eftir því að um helgar hverfur morguntoppurinn og síðdegistoppurinn verður lægri. TomTom tafagildi eru því lægri um helgar en á virkum dögum.

3.1.1 Notkun TomTom tafagilda til að meta umferðartafir

Umferðartafir á hverjum tíma eru margfeldi tafa á faratæki margfaldað með fjölda farartækja, þ.e.

$$Taf(t) = taf(t) \cdot n(t),$$

þar sem $taf(t)$ er meðaltöf á tíma t og $n(t)$ er fjöldi bíla.

Miðað við ósamfelldan tíma eru þá heildartafir yfir tímabil að lengd T

$$TAF(T) = \sum_{t=0}^T taf(t) \cdot n(t),$$

og meðaltöf á tímaeiningu, t.d. klst. eða dag er:

$$\frac{TAF(T)}{T} = \left(\sum_{t=0}^T taf(t) \cdot n(t) \right) \cdot \frac{1}{T}.$$

Væru tímaraðirnar $taf(t)$ og $n(t)$ þekktar væri unnt að finna bæði ofangreindar heildartafir og meðaltöf á tímaeiningu. Gallinn er að þessi þekking er ekki fyrir hendi. Viðkomandi umferðarmælingar hafa ekki verið gerðar. Þær mælingar sem fyrir liggja eru fjöldi faratækja á dag að meðaltali og ofangreind TomTom tafagildi.

Á árinu 2019 sem er grunnár þessara reikninga mælist TomTom tafagildi 0,18, þ.e. meðaltöf í umferðinni samkvæmt TomTom tafagildi er 18%. Þetta meðaltal er reiknað á grundvelli tafagildis á hverri klukkustund allt árið (8760 klst.). Þetta hlutfall er hins vegar ekki mat á tafatíma í heild. Hann er miklu hærri því þegar flestir bílar eru á vegum er tafatíminn mestur. Í viðauka 3.A er formlega sýnt fram á að mat á umferðartöfum yfir eitthvað tímabil, t.d. dag, viku eða ár, sem reiknað er sem margfeldi meðaltafa á bíl og meðalfjölda bíla yfir tímabilið felur í sér vanmat ef jákvæð fylgni er milli fjölda bíla á vegum og umferðartafa. Nánar tiltekið er í viðauka 3.A sýnt fram á að vongildi tafatíma allra bíla:

$$(27) \quad E(taf \cdot n) = E(taf) \cdot E(n) \cdot (1 + Cor(taf, n) \cdot Cvar(taf) \cdot Cvar(n)),$$

þar sem þar sem $E(\cdot)$ er svokallaður vongildisgjörvi (e. expectations operator), $Cor(taf, n)$ táknar fylgnina (e. correlation) milli taf og n og $Sdev(z)$ er staðalfrávik (e. standard deviation) fyrir z og $Cvar(z)$ er svokallaður breytileikastuðull (e. coefficient of variation) fyrir z .¹⁷

Til að einfalda táknmálið má rita (1):

$$(27b) \quad E(taf \cdot n) = E(taf) \cdot E(n) \cdot \Psi,$$

þar sem stærðina $\Psi = (1 + Cor(taf, n) \cdot Cvar(taf) \cdot Cvar(n))$ má skoða sem leiðréttingarstuðull. Eins og nánar er útskýrt í viðauka 3.A er líklegt vikugildi á leiðréttingarstuðlinum Ψ á bilinu 1,7 til 2,0 fyrir klukkustundarupplausn eins og mynd 3.1.

Nú er breytan taf í líkingu (1) samkvæmt TomTom mælingu margfeldi TomTom tafagildisins og ferðatíma í frjálssu flæði, þ.e. $taf = Tom \cdot tff$, þar sem Tom er TomTom tafagildið (0,18 á árinu 2019) og tff er ferðatími í frjálssu flæði. Til að nota TomTom mælingarnar þurfum við því að áætla tff .¹⁸

Á þjóðvegakerfi höfuðborgarsvæðisins er hraði bifreiða í frjálssu flæði sennilega um 80 km/klst, nema þar sem eru umferðaljós eða miklar beygjur; þar dettur hann niður í um 50-60 km/klst. Væntanlega er ekki fjarri lagi að reikna með 70 km./klst. meðalhraða á lengri leiðum og 50 km./klst. á þeim styttri. Nú er um lengsta leiðin milli vinnu og heimils um 20 km á höfuðborgarsvæðinu, en meira en helmingur er undir 8-10 km. Líkast til er því tff um 17 mínútur að meðaltali fyrir þann helming sem fer lengri leið, en um 12 fyrir þann sem fer

¹⁷ Nánar tiltekið er $Cvar(z) = Sdev(z)/E(z)$.

¹⁸ Rétt er að taka fram að tff , ferðatími í frjálssu flæði, ræðst væntanlega af umferðarmannvirkjum og umferðarreglum og er því óháður fjölda faratækja og umferðartöfum á liðandi stund.

styttri leið, eða um 14 mínútur fyrir allan hópinn. Hver bíll fer liðlega 4 ferðir á dag, tvær í vinnuna og heim og tvær aðrar ferðir sem að jafnaði eru styttri. Meðal tff fyrir allar ferðir gæti því verið um 10 mínútur á ferð. Um þetta er þó mikil óvissa og því einnig miðað við bæði 8 mínútur og 12 mínútur hér að neðan.

Samkvæmt miðgildinu, 10 mínútur á ferð, þessu eru tafir í hverri ferð, þ.e.

$Tom \cdot tff \cdot \Psi = 0,18 \cdot 10 \cdot 1,8 = 3,2$ mínútur að jafnaði, með óvissubili upp á 2,6 til 3,8 mínútur.

Til að finna heildartöf á sólarhring þarf eins og fram kemur í fram kemur í líkingum (1) og (1b) auðvitað að margfalda meðaltöf á ferð með fjölda ferða á sólarhring. Samkvæmt mælingum sem gerðar voru í október árið 2019 voru bílferðir á höfuðborgarsvæðinu u.þ.b. 760 þús. á sólarhring (sjá viðauka 3.B). Að meðtöldum farþegum (25% af ferðum) gerir þetta u.þ.b. 950 þús. einstaklingsferðir á sólarhring.

Með hjálp ofangreindra matsstærða og líkingar (1b) er nú unnt að reikna tafatíma í bifreiðum á sólarhring á grundvelli TomTom mælinga með líkingunni

$$(28) \quad \text{Tafatími} = N \cdot Tom \cdot tff \cdot \Psi,$$

þar sem $N = 1,25 \cdot E(n)$ er fjöldi einstaklingsferða á sólarhring, Tom er TomTom tafagildi, tff meðallengd ferðar og Ψ er leiðréttingarstuðullinn.

3.1.2 Mat á tafatíma

Niðurstöður reikninga á tafatíma á grundvelli líkingar (2) miðað við mismunandi forsendur um gildi tff og leiðréttingarstuðulsins Ψ eru raktar í töflu 3.1.

Tafla 3.1 Reiknaður tafatími í bílferðum (Þúsund klst./sólarhring). Forsendur: TomTom tafagildi 0,18; fjöldi einstaklingsferða í bíl á sólarhring 950 þús.			
Lengd bílfarar, tff , (mín)	Leiðréttingarstuðull, Ψ		
	1,7	1,8	1,9
8	38,760	41,040	43,320
10	47,843	51,300	54,150
12	58,140	61,560	64,980

Samkvæmt niðurstöðum í töflu 3.1 eru tafatími í bílaumferð á höfuðborgarsvæðinu á bilinu tæplega 39 til 65 þúsund klukkustundir/sólarhring.

3.2 Mat á grundvelli spurningakönnunar

Í maí 2021 framkvæmdi MMR könnun á ferðavenjum á höfuðborgarsvæðinu að beiðni SFA (Samgangna fyrir alla).¹⁹ 611 manns á höfuðborgarsvæðinu svöruðu könnuninni.

Á meðal upplýsinga í þessari könnun var ferðamáti svarenda á höfuðborgarsvæðinu í maí 2021 og mat þeirra á tafatíma í umferðinni í þeim mánuði. Á grundvelli þessara upplýsinga er unnt að áætla tafatíma í umferðinni á höfuðborgarsvæðinu sem og meðaltafatíma í einkabílaumferð sérstaklega. Þetta mat byggir þó á fremur veikum grunni, þ.e. niðurstöðum úr spurningakönnun og ýmsum öðrum forsendum, og er því mikilli óvissu háð.

3.2.1 Gögnin

Í ofangreindri könnun MMR (sjá nánar Bjarni Reynarsson 2021) var spurt um ferðamáta á höfuðborgarsvæðinu í maí 2021. Óljóst er hvað svörin merkja nákvæmlega, en ætla má að þau endurspegli hlutfall mismunandi ferðamáta í heildarfjölda ferða. Niðurstöðurnar voru:

Tafla 3.2 Ferðamáti á höfuðborgarsvæðinu Hlutfall heildarferða einkaðila (ferðir atvinnubíla ekki meðtaldar)				
Einkabíll	Gangandi	Strætó	Reiðhjól	Annað*
79%	8%	5%	4%	4%
* Rafhjól, rafhlaupahjól og annað				

Þessar tölur þessar um ferðamáta eru í sæmilegu samræmi við önnur gögn um skiptingu umferðar á höfuðborgarsvæðinu. Af samanlögðum ferðum með einkabílum og strætisvögnum eru ferðir með einkabílum taldar um 94% og strætisvagnaferðir um 6%. Hins vegar samkvæmt umferðaspá í nýju samgöngulíkani (Þórarinn Hjaltason 2021) var hlutur strætisvagna í bílferðum árið 2019 talinn um 3,2% en hlutur annarra bifreiða 96,8%. Og í skýrslu Mannvits og Cowi (2020, tafla 5-3) eru farþegakílómetrar 2024 með einkabílum áætlaðir rúmlega 96% (96,4%) af öllum farþegakílómetrum í bifreið en tæplega 4% með strætisvögnum (3,6%). Könnun MMR virðist því ofmeta hlutdeild strætisvagnaferða nokkuð. Munurinn er þó ekki meiri en svo að telja má þessar niðurstöður fremur renna stöðum undir áreiðanleika könnunar MMR en hitt.

Í könnun MMR töldu viðmælendur að þeir myndu geta sparað sér að jafnaði 11:15 (væntanlega 11,25) mínútur í daglegum ferðum sínum ef umferðartafir væru engar. Ekki er ljóst hvaða umferðartafir viðmælendur eru að vísa til í þessum svörum. Hugsanlegt er að þau vísi til umferðartafa í einkabílum einvörðungu. Einnig er hugsanlegt að þau vísi til umferðartafa í öllum ferðamátum. Þá er heldur ekki ljóst hvað átt er við með töfum í umferð. Sennilegt virðist að þetta mat miðist við tafir vegna annarra vegfarenda að gefnum umferðarmannvirkjum og -reglum en ekki tafir vegna ófullkominna umferðarmannvirkja eða óheppilegra umferðarreglna.

¹⁹ Sjá nánar Bjarni Reynarsson 2021.

Íbúatala á höfuðborgarsvæðinu í upphafi árs 2021 var samkvæmt Hagstofu Íslands sem hér segir:

<p>Tafla 3.3 Íbúatala á höfuðborgarsvæðinu (Hafnarfj., Garðab., Álftanes, Kópav., Reykjav., Seltjarnarn. og Mosfellsb.) 01.01.2021 Heimild: Hagstofa Íslands</p>		
	Höfuðborgarsvæðið	Reykjavík
Íbúatala	234.813	132.252
16 ára og eldri	188.207	107.757

3.2.2 Mat

Sé litið á ofangreindar niðurstöður í könnun MMR um umferðartafir á mann á dag sem dæmigerðar fyrir íbúa höfuðborgarsvæðisins fást eftirfarandi niðurstöður um umferðartafir einstaklinga í heild:

<p>Tafla 3.4 Mat á heildartöfum einstaklinga í umferð á höfuðborgarsvæðinu á dag (klst.) Forsendur: Meðaltöf á íbúa 11,25 mín.</p>		
	Höfuðborgarsvæðið	Reykjavík
Allir íbúar	44027	24797
16 ára og eldri	35288	20204

Ætla má að ofangreint mat miðast einvörðungu við umferðartafir einkaaðila en ekki við tafir atvinnubíla (þ.e. vöru- og sendibíla), en umferð þeirra mun bæta um 7,4% við umferð einkabíla (sjá Mannvit og Cowi 2020 töflu 5-3). Séu tafirnar í töflu 3 hækkaðar samsvarandi (þ.e. um 7,4%) fást eftirfarandi niðurstöður:

<p>Tafla 3.5 Mat á heildartöfum (bæði einkaakstur og atvinnuakstur) í umferð á höfuðborgarsvæðinu á dag (klst.) Forsendur: Meðaltöf á íbúa 11,25 mín.</p>		
	Höfuðborgarsvæðið	Reykjavík
Allir íbúar	47285	26632
16 ára og eldri	37900	21699

3.2.3 Um áreiðanleika þessa mats á tafakostnaði

Þetta mat á tafakostnaði byggir á nokkrum veikum forsendum. Þeirra á meðal má nefna:

- Matið á meðaltafatíma á dag er samkvæmt spurningkönnun. Óvissubíl er því verulegt, hæglega +/- 20% .

- Ekki er fyllilega ljóst hvað svör um tafatíma í umferð merkja. Taka þau einvörðungu til tafa vegna annarrar umferðar eða e.t.v. einnig tafa vegna umferðarmannvirkja, t.d. umferðarljósa, hraðahindrana? Eigi hið fyrrnefnda aðallega við (sem virðist sennilegra) vanmetur uppgefinn tafatími raunverulegan tafatíma. Eiga þau við um alla ferðamáta eða aðeins bílferðir? Eigi þær við um alla ferðamáta má ætla að tafir í bílferðum sé lægri en uppgefinn tafatími.

Þegar á allt er litið getur áreiðanleiki þessa mats ekki talist mikill. Slagsíða (e. bias) virðist í fljótu bragði þó fremur vera niður á við (þ.e. vanmat) en upp á við.

3.3 Mat á grundvelli fjölda bílferða

Í þessum kafla er lagt mat á tafakostnað í bifreiðaumferð á höfuðborgarsvæðinu á grundvelli fjölda bílferða og áætlaðri meðaltöf í hverri ferð. Þar sem hið sanna gildi beggja þessara stærða er óþekkt er reynt að gera grein fyrir óvissunni með því íhuga líkleg efri og neðri mörk þeirra,

3.3.1 Gögn

Fyrir liggur mat á daglegum bílferða á höfuðborgarsvæðinu (sjá viðauka 3.B). Samkvæmt reikningum í viðauka 3.B var daglegur fjöldi einkabílferða árið 2019 um 760 þús. Talið er að jafnaði séu 1,25 farþegar í hverri einkabifreið. Samkvæmt þessu eru þá daglegar farþegaferðir í einkabifreiðum á höfuðborgarsvæðinu u.þ.b. 950 þús.²⁰

Eins og rakið er í viðauka 3.B eru ferðir í einkabifreiðum aðeins hluti af bílferðum um höfuðborgarsvæðið. Við þær ferðir þarf að bæta ferðum atvinnubifreiða sem gætu hæglega hækkað þessa tölu um 20%.

Ekki liggja fyrir sæmilega vandaðar mælingar á meðaltafatíma í bílferð á höfuðborgarsvæðinu. Bílferðir eru og fjölbreytilegar. Sumar eru um talsvert langan veg eftir stofn- og tengibrautum oft til og frá vinnu eða til og frá þjónustueiningum af ýmsu tagi. Aðrar eru skemmri og að verulegu leyti innan hverfis. TomTom mælingar á umferð (sjá kafla 3.1 hér að framan) og könnun MMR (sjá kafla 3.2) benda til að meðaltafatími að gefnum umferðarmannvirkjum og umferðarreglum geti vel verið á verið 2-4 mínútur á bílferð. Tafir vegna slakra umferðarmannvirkja, umferðarljósa og annarra hindrana bæta ugglaut talsverðum ferðatíma við þetta mat. Þeir sem aka sæmilegar vegalengdir til og frá vinnu eftir stofnbrautum þekkja vel að tafatími í þeim ferðum getur hæglega verið nær 10 mínútum. Þessi staðreynd ásamt lauslegum athugunum á götum höfuðborgarsvæðisins og samtöl við vegfarendur benda til að tafatími að jafnaði geti hæglega verið 3-4 mínútur í ferð að jafnaði.

²⁰ Athugið að þessi áætlun miðast við upplýsingar frá 2019. Síðan þá hefur íbúatala höfuðborgarsvæðisins hækkað um nálægt 4%. Því má ætla að fjöldi farþegaferða í bifreiðum hafi hækkað um a.m.k. sama hlutfall frá því ári, a.m.k. miðað við eðlilegar samfélagsaðstæður.

Eins og rakið er í kafla 3.1 hér að framan eru umferðartafir miklu meiri á sumum tímum sólarhringsins, dögum og árstímum en öðrum. Rétt er að taka það fram að ofangreindur tafatími er auðvitað vegið meðaltal fyrir allar ferðir á hinum ýmsu tímum sólarhringsins.²¹

Til að taka visst tillit til óvissunnar um hið sanna gildi fjölda bílferða og tafatíma á bílferð er gripið til þess ráðs að skýrgreina líkleg efri og neðri mörk fyrir þessar breytur. Því miður er ekki meira vitað um þessi óvissubíl en vongildi breytanna. Að öllu samanlögðu er talið líklegt að fjölda einstaklingsferða í bifreið geti verið á bilinu 800-1200 þús. á sólahring og tafatími per ferð að á bilinu 2-5 mínútur.

3.3.2 Mat á tafatíma

Helstu niðurstöður um tafatíma á sólahring eru raktar í töflu 3.6

Tafla 3.6 Tafatími á sólahring (þús. klst.)				
Ferðir á dag (þús.)	Tafir í ferð			
	2 mín	3 mín	4 mín	5 mín
800	26.667	40.000	53.333	66.667
1000	33.333	50.000	66.667	83.333
1200	40.000	60.000	80.000	100.000

Eins og sjá má spannar reiknaður tafatími í töflu 3.6 talsvert vítt bil. Líklegast sýnist að fjöldi einstaklingsferða í einkabifreiða sé á bilinu 800-1000 þúsund og tafatími í ferð 2-4 mínútur að jafnaði . Því gæti viðeigandi óvissubíl fyrir heildartafir á sólahring á höfuðborgarsvæðinu verið á bilinu 26,7 til 66.7 þús. klukkustundir.

3.3.3 Um áreiðanleika þessa mats á tafakostnaði

Þetta mat á tafakostnaði byggir á einungis á tvennu; mati á fjölda bílferða á höfuðborgarsvæðinu og forsendu um meðaltöf í hverri bílferð. Fyrirnefnda stærðin, fjöldi bílferða, hvílir á sæmilegum mælingum þótt auðvitað sé um réttu töluna nokkur óvissa. Síðari stærðin, meðaltöf í hverri bílferð, er miklu óvissari stærð. Auðvitað hafa bílverjar á höfuðborgarsvæðinu góða hugmynd um þessa meðaltöf, en að því er virðist hefur ekki verið skipulega reynt að afla upplýsinga um þetta mat þeirra.

Meðaltöf í námunda við 3 mínútur á ferð er hins vegar í sæmilegu samræmi við önnur gögn sem m.a. er birt í þessari skýrslu. Talið er að meðalfjöldi bílferða per íbúa á höfuðborgarsvæðinu sé um 4 ferðir á dag. Sé svo og meðaltöfin um 3 mínútur í ferð er heildartöf í bílaumferð á hvern bílverja á höfuðborgarsvæðinu í námunda við 12 mínútur. Er

²¹ Nánar tiltekið er þessi meðaltafatími skýrgreindur sem vongildi tafatíma $\int_0^T t(\tau) \cdot f(\tau) d\tau$, þar sem

T er viðkomandi tímabil, t.d. sólahringur, $t(\tau)$ er tafatími á sólahringstímanum τ og $f(\tau)$ þéttifall bílferða (mælikvarði á líkur á að fara í bílferð) á tíma τ .

Það í sæmilegu samræmi við matið í spurningakönnun MMR sem var upp á 11,25 mínútur á dag.

Þrátt fyrir þessa óvissu um meðaltöf í ferð og að einhverju leyti fjölda bílferða sýnist ólíklegt að sönnu gilin fyrir þessar stærðir myndu leiða til heildartafa á sólarhring utan þeirra óvissumarka sem fram koma í töflu 3.6 og nánar voru tilgreind undir lok kafla 3.3.2.

3.4 Samantekt - umræða

Niðurstöður ofangreindra þriggja aðferða um tafatíma í umferð á höfuðborgarsvæðinu eru á svipuðu róli. Líklegustu tafir samkvæmt þeim öllum er í námunda við 50 þús. klst á dag, en óvissubilið er vítt. Þessar niðurstöður eru nánar raktar í töflu 3.7.

Tafli 3.7 Tafatími á dag: Niðurstöður með mismunandi aðferðum (Klukkustundir á dag)			
Matsaðferð	Neðri mörk	Líklegast	Efri mörk
TomTom mælingar	38.760	51.300	64.980
Könnun MMR*	37.828	47.285	56.742
Mat á fjölda bílferða	26.667	50.000	66.667
* Óvissubil sett $\pm 20\%$			

Nú eru ekki allir dagar jafn umferðarþungir. Til dæmis er vel þekkt að umferð um helgar er að jafnaði minni en á virkum dögum (sjá t.d. TomTom mælingar í kafla 3.1). Því er við mat á umferðarþunga og umferðartöfum yfir heilt ár gjarnan miðað við 300 jafngilda daga. Þetta samsvarar því að umferðartafir á helgi- og frídögum séu taldar um 38% af því sem þær eru á virkum dögum.²²

Það er auðvitað spurning hvort ofangreint mat á tafatíma á sólarhring miðist alla daga ársins eða aðeins virka daga. TomTom matið byggist sem fyrr greinir á meðaltali allra daga ársins. Á hinn bóginn er ekki ósennilegt að viðmælendur í könnun MMR (kafla 3.2) hafi fyrst og fremst veidd að hugsa um virka daga er þeir lögðu fram mat sitt á daglegum tafatíma.

Ef sólarhringstafatölurnar í töflu 3.6 eiga við um alla daga þar að margfalda þær með 365 dögum til að fá árgildin en með 300 dögum ef þær eiga aðeins við um virka daga. Þar sem ekki er þekkt hvort á betur við er hvort tveggja er gert í töflunum hér að neðan.

²² Fimm virkir dagar á viku eru um 260 dagar á ári. Tveir helgidagar í viku eru þá um 105 dagar á ári. 38% af þeim er þá um 40 dagar sem gefur um 300 daga á ári. Nú eru helgidagar á hverju ári fleiri en tveir á viku. Til að fá 300 jafngilda daga eru umferðartafir á helgidögum taldar eitthvað hærra en 38% af virkum dögum.

Tafla 3.8 Tafatími á ári (Milljón klukkustundir) (Miðað við 300 daga á ári)			
	Neðri mörk	Líklegast	Efri mörk
TomTom mælingar	11.628	15.390	19.494
Könnun MMR	11.348	14.186	17.023
Fjöldi bílferða	8.000	15.000	20.000

Tafla 3.9 Tafatími á ári (Milljón klukkustundir) (Miðað við 365 daga á ári)			
	Neðri mörk	Líklegast	Efri mörk
TomTom mælingar	14.147	18.725	23.718
Könnun MMR	13.807	17.259	20.711
Fjöldi bílferða	9.733	18.250	24.333

Varlegra er að miða við 300 daga á ári, þ.e. töflu 3.8. Miðað við þá töflu gætu því árstafir í umferðinni á höfuðborgarsvæðinu verið um 15 milljón klst. Réttu talan samkvæmt óvissubílunum í töflu 3.8 gæti legið á bilinu 9 til 20 milljón klst.

Rétt er að minna á að ofangreint mat miðast við umferð einkabifreiða. Fullvíst má telja að umferð atvinnubíla sé mjög veruleg á höfuðborgarsvæðinu og geti hæglega bætt 20% við umferð einkabifreiða. Að þessu leyti fela ofangreindar tölur og óvissubil í sér vanmat á heildarumferð í bifreiðum á höfuðborgarsvæðinu.

Þá er einnig rétt að hafa í huga að óljóst er að hve miklu leyti ofangreint mat takmarkast við tafir vegna annarrar umferðar og að hve miklu leyti það tekur tillit til tafa sem hönnun umferðarmannvirkja og umferðarstýringar með t.a.m. umferðarljósum og hraðahindrunum veldur. Hvað TomTom matið snertir er ljóst að það einskorðast við tafir vegna annarrar umferðar. Að þessu leyti vanmetur það mat tafirnar við að komst milli staða á höfuðborgarsvæðinu. Sennilega á það sama við hinar matsaðferðirnar að einhverju leyti.

4. Tímavirði tafa

Í kafla 2.2 voru færð hagfræðileg rök fyrir því að virði tafatíma mætti lýsa með líkingunni:

$$(17) \quad v = w + (U_{t_v} - U_{t_t}),$$

þar sem w er vinnutekjur á tímaeiningu, U_{t_v} jaðarnyt vinnutíma og U_{t_t} jaðarnyt tafatíma. Mikilvægt er að átta sig á því að w í þessu samhengi eru allar tekjur sem vinna skapar en ekki einungis laun sem greidd eru launþegum.

Eins og rakið er í kafla 2.2, er óhætt að gera ráð fyrir að jaðarnyt af tafatíma, U_{t_t} , sé neikvæð. Í fljótu bragði virðist líklegt að jaðarnyt af tafatíma í umferð sé neikvæðari en jaðarnyt af vinnutíma (sem gæti í ýmsum tilfellum jafnvel verið jákvæð). Sé svo er $(U_{t_v} - U_{t_t}) > 0$ og virði tafatíma í umferð er hærri en vinnutekjur. Þetta snýst hins vegar við ef jaðarnyt vinnutíma er neikvæðari en jaðarnyt tafatíma, þ.e. menn kjósa heldur að tefjast í umferðinni en vera í vinnunni. Það á e.t.v. við um einhverja, en afar langsótt virðist að það eigi við um bílverja að jafnaði.

Til einföldunar má gera ráð fyrir að $(U_{t_v} - U_{t_t}) = 0$ og meta virði tafatíma sem vinnutekjur á klst. þ.e. $v = w$. Þar sem líklegra virðist að $(U_{t_v} - U_{t_t}) > 0$ leiðir þessi einföldun fremur til vanmats á virði tafatíma en hitt.

4.1 Vinnutekjur

Líking (17) er leidd út frá sjónarmiði dæmigerðs einstaklings sem leitast við að hámarka not sín. Í því samhengi er w það sem hann uppsker fyrir vinnu sína. Þar sem þessi skýrsla snýst um umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu á þessi dæmigerði einstaklingur auðvitað að vera einkennandi fyrir þá sem ferðast í bifreiðum á höfuðborgarsvæðinu. En hverjar eru vinnutekjur slíks meðalmanns?

Hagstofan tekur saman gögn um unnar vinnustundir á landinu og viðamikil gögn um tekjur landsmanna (sjá heimasíðu Hagstofunnar, kaflana um vinnumagn og framleiðni og þjóðhagsreikninga). Tekjunum er skipt í ýmsa flokka, þar á meðal þjóðartekjur, vinnulaun með og án tryggingargjalds, hagnað fyrirtækja og fleira.

Nú má líta svo á að öll þjóðarframleiðslan sé sköpuð af vinnu í þeim skilningi að hún yrði engin án vinnu. Samkvæmt því er það sem nefna má þjóðhagsleg vinnutekjur einfaldlega þjóðarframleiðslan á móti vinnumagni.

Nær lagi er þó sennilega að taka tillit til þess að þjóðarframleiðslan verður til við samspil vinnu og fjármuna. Í hagfræði er slíkt samhengi jafnan ritað sem $Y(l, k)$, þar sem l táknar vinnumagn og k notkun fjármuna (sjá t.d. Dixit 1976). Oft er gert ráð fyrir að fallið $Y(l, k)$ sé svo kallað Cobb-Douglas fall. Sé svo, er unnt að sýna fram á að skuggavirði vinnuafls (þ.e. vinnutekjur við fullkomna samkeppni) séu:

$$w = Y_l(l, k) = a \cdot \frac{Y(l, k)}{l},$$

Þar sem stuðullinn a er hlutdeild vinnuafslisins í þjóðarframleiðslunni (Dixit 1976). Samkvæmt alþjóðlegum mælingum er þessi hlutdeild á vesturlöndum yfirleitt milli 0,6 og 0,7 (sjá t.d. Alþýðusamband Íslands 2022, Eurostat og UNCE 2022). Á Íslandi er þetta hlutfall breytilegra en víðasta annars staðar en er talið að jafnaði um 0,67 (sjá Fjármála og -efnahagsráðuneytið 2021 og Alþýðusamband Íslands 2022).

Í gagnasafni Hagstofunnar er einnig að finna upplýsingar um heildarlaun með og án launatengdra gjalda og rekstrarafgang fyrirtækja. Hér er um að ræða bæði laun til launþega og reiknuð laun til þeirra sem reka fyrirtæki. Þessi laun eru nálægt því sem telja má vinnutekjur einstaklinga. Það er hins vegar rétt að hafa í huga að þessi laun eru hins vegar ekki endurgjald fyrir alla vinnu því hluti af því endurgjaldi er greitt sem arður af hagnaði fyrirtækja.

Nú er það svo að sá sem aflar tekna með vinnu heldur þeim tekjum ekki öllum. Hluti af vinnutekjum fer í að greiða tekjutengda skatta annars vegar tekjuskatt til ríkisins og hins vegar útsvar til sveitarfélaga. Summa þessara tveggja tekjutengdu skatta verður einfaldlega kölluð tekjuskattar hér að neðan. Þá er hluti af vinnutekjum settur til hliðar í formi svokallaðra launatengdra gjalda. Hinn vinnandi maður fær því ekki þennan hluta vinnuteknanna í vasann fyrr en ef til vill síðar.

Á Íslandi eru tekjuskattar á einstaklinga að langmestu leyti greiddir jafnharðan og tekjur myndast. Það er því vel hugsanlegt að viðeigandi vinnutekjur hans í líkingu (17), þ.e. w , eigi að vera eftir skatt. Á móti kemur að einstaklingurinn nýtur góðs af þeirri opinberu þjónustu sem fjármögnuð er með tekjuskattinum. Að þessu leyti lítur hann sennilega ekki á tekjuskattinn sem fyllilega tapað fé. Tæpast þarf að taka það fram að frá sjónarmiði þjóðfélagsins í heild eru tekjuskattarnir hins vegar síður en svo tapað fé og vinnutekjur fyrir skatta eru frá þjóðhagslegu sjónarmiði það sem máli skiptir.

Á Íslandi rennur hluti vinnutekna ekki beint til einstaklinga. Hluti þeirra, launatengd gjöldin, fara í innistæður sem gagnast eiga viðkomandi einstaklingi síðar. Þar eru veigamestu þættirnir skyldubundið lífeyrisframlag, söfnun í árlegan orlofssjóð og svokölluð tryggingargjöld. Fyrrnefndu liðirnir þættirnir tveir tilheyrja í megindráttum einstaklingnum þótt hann geti ekki nýtt þá fyrr en síðar. Þriðji þáttur er líkari skyldubundinni tryggingu sem óvíst er hversu mikið nýtist viðkomandi einstaklingi. Þó má líklegt telja að margir myndu kjósa að ráðstafa viðkomandi tekjum í að kaupa hliðstæðar tryggingar ef þær rynnu ekki sjálfkrafa til slíkra þarfa.

Launatengdu gjöldin eru því greinilega ekki eins og tekjuskattar. Viðkomandi einstaklingur heldur þorra þeirra þótt hann geti ekki ráðstafað þeim fyrr en síðar. Þau eru hins vegar jafngreinilega ekki jafngild útgreiddum launum. Því er hæpið að telja þau að fullu með þeim vinnutekjum sem máli skipta fyrir einstaklinginn í líkingu (17), þ.e. w . Frá þjóðhagslegu sjónarmiði eru launatengdu gjöldin hins vegar ekkert fremur tapað fé en tekjuskattarnir.

Samkvæmt ofangreindu geta verið áhöld um hvaða stærðir í opinberum hagtölum endurspegla vinnutekjurnar, w , í líkingu (17) best. Af þeim sökum er væntanlega gagnlegast að gera grein fyrir hinum ýmsu mælikvörðum af þessu tagi sem nefndir hafa verið hér að ofan. Er það gert töflu 4.1. Þar sem rök standa bæði til þess að skoða vinnutekjur fyrir og eftir tekjuskatta er hvort tveggja sýnt í töflu 4.1.

Tafla 4.1

Mismunandi mælikvarðar á vinnutekjur (kr./klst.)

Unnar vinnustundir 2019: 299,582 m. klst.

Hlutdeild vinnuafls í VLF: $a=0,67$

Tekjuskattar á einstaklinga: 435,321 mia. kr.

	Á unna klst.			
	Fyrir tekjuskatta	Eftir tekjuskatta	Fyrir tekjuskatta	Eftir tekjuskatta
	Mia. kr.	Mia. kr.	Kr./klst.	Kr./klst.
VLF	3047,727	2612,406	10173	8720
$a \cdot VLF$	2041,977	1606,656	6816	5363
Útgr. laun+lt.gjöld+hr. rekstr.afgang.	2164,599	1729,278	7225	5772
Útgr. laun+hreinn rekstr.afgangur	1848,242	1412,921	6169	4716
Útgr. laun+lt.gjöld	1621,511	1186,190	5413	3959
Útgr. laun	1305,154	869,833	4357	2903

Eins og sjá má í töflu 4.1 spanna þessir mælikvarðar á vinnutekjur nokkuð vítt bil. Fyrir tekjuskatta er það um það bil 4300-10200 kr./klst. og eftir tekjuskatta 2900-8720 kr./klst.

Sem fyrr greinir er ástæða til að gera greinarmun á þjóðhagslegum vinnutekjum, þ.e. þeim verðmætum sem vinnan skapar fyrir samfélagið í heild, og einstaklingsbundnum vinnutekjum, þ.e. þeim sem rennur í vasa viðkomandi einstaklings. Mismunurinn á þessu tvennu er fyrst og fremst opinber gjöld.

Af töflu 4.1 má ráða að þjóðhagslegar vinnutekjur séu á bilinu 6800 til 10200 kr./klst. og einstaklingsbundnar vinnutekjur á bilinu 2900 til 7200 kr./klst.

4.2 Aðrar rannsóknir á tímavirði

Ekki virðast hafa verið framkvæmdar vandlegar rannsóknir á tímavirði í samgöngum á Íslandi. Fjöldi slíkra athugana hafa hins vegar verið gerðar erlendis.²³ Niðurstöður þeirra spanna sömuleiðis talsvert vítt bil. Hluti af ástæðunni er mismunandi tekjustig milli landa, en rannsóknir sýna að tímavirði vex jafnan með tekjustigi.²⁴ Þannig er í einni metarannsókn (Wardman og fél. 2016) tímavirði í Luxemborg metið á 25.68 EUR/klst. en á aðeins á 5,47 EUR/klst. í Póllandi (verðlag 2010 í báðum tilfellum), en þjóðarframleiðsla á mann í Luxemborg er meira en fjórföld hærri en í Póllandi.

Í skýrslu Mannvits og Cowi (2020) er lagt mat á tímavirði í umferð á Íslandi. Það mat byggir á dönskum rannsóknum (sjá m.a. Fosgerau og fél. 2007) uppfærðum til ársins 2020 og löguðum að íslenskum aðstæðum. Grunnforsenda í íslensku staðfæringunni er að tímavirði sé 65% af ráðstöfunarlaunum á klukkustund (Mannvit og Cowi bls. 47). Ekki eru færð nein rök fyrir þessari forsendu í skýrslunni og ekki að sjá að hún byggist á hagfræðilegum rannsóknum. Samkvæmt hinni hagrænu greiningu á tímavirði í kafla 2.3 sem endurspeglast í

²³ Dæmi um þær eru Mackie og fél. 2003, Fosgerau og fél. 2007, Wardman og fél. 2016 og White 2016.

²⁴ Sú empíríska niðurstaða er í samræmi við hina fræðilegu greiningu í kafla 2.3 í þessari skýrslu.

líkingu (17), þurfa vegfarendur kjósa tafir í umferð miklu frekar en sama tíma í vinnunni til þess að þessi forsenda geti verið rétt.²⁵ Það virðist langsótt svo ekki sé meira sagt.

Þrátt fyrir þetta eru helstu niðurstöður um tímavirði í umferð í skýrslu Mannvits og Cowi ekki ýkja fjarri matinu í kafla 4.1 hér að framan. Samkvæmt Mannviti og Cowi er þetta tímavirði kr. 2763 kr./klst. í vel flæðandi umferð og 4154 kr./klst. þegar um umferðartafir er að ræða. Síðari talan, sem auðvitað á við þegar verið er að meta tímavirði í umferðartöfum er vel innan þess matsbils sem sett var fram í kafla 4.1. Sé fyrrnefndri 65% lækkun sleppt er þetta mat Mannvits og Cowi á tímavirði 4250 í frjálsum flæði og 6376 kr./klst. í umferðartöfum. Erú báðar þessar tölur vel innan marka fyrir mat á einstaklingsbundnum vinnutekjum í kafla 4.1.

4.3 Niðurstaða

Fyrirliggjandi þekking er ekki næg til að unnt sé að leggja nákvæmt mat á tímavirði í umferð á höfuðborgarsvæðinu.

Í kafla 4.1 var matsbil fyrir einstaklingsbundnar vinnutekjur talið milli 2900 kr./klst. og 7200 kr./klst. Meðaltal þess bils er 5050 kr./klst. (verðlag 2019). Það meðaltal er ekki ýkja fjarri meðaltali mats Mannvits og Cowi (2020) á tímavirði í frjálsum flæði og í umferðartöfum sem er 5313 kr./klst. (verðlagi 2020). Sé á annað borð talið nauðsynlegt að hafa eina tölu fyrir einstaklingsbundið tímavirði í umferð á höfuðborgarsvæðinu virðast 5000 kr./klst. vera varfærið mat.

Þjóðhagslegt tímavirði, þ.e. virði vinnutíma frá sjónarmiði samfélagsins í heild, er hins vegar miklu hærra. Meðaltal matsbils fyrir þjóðhagslegt tímavirði í kafla 4.1 er 8500 kr./klst.

²⁵ Nánar tiltekið; samkvæmt líkingu (17) þarf $U_{t_v} = U_t - 0,35 \cdot w$ til þess að forsendan standist.

5. Kostnaður við umferðartafir

Í kafla 3 var fjallað um umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu. Niðurstaðan var að árinu 2019 væri líklegast að umferðartafir hefðu verið í námunda við 15 m. klst. með óvissubílinu [9-20] m. klst.

Í kafla 4 var fjallað um virði tíma í umferðartöfum. Niðurstaðan var að frá sjónarmiði einstaklinga gæti sú upphæð verið nálægt 5000 kr./klst. miðað við og á verðlagi ársins 2019 með óvissubílinu [2900-7200] kr./klst. Frá þjóðhagslegu sjónarmiði gæti þetta tímavirði hins vegar verið talsvert hærra eða um 8500 kr./klst. með óvissubílinu [6800-10200] kr./klst. Eins og útskýrt var í kafla 4.

5.1 Leiðrétting á tímavirði vegna mismunandi hópa

Nú er það vafalaust að tímavirði fólks er mjög mismunandi. Ræðst það auðvitað mest af vinnutekjum viðkomandi eins og greiningin í kafla 2 og líking (17) gefa til kynna. Talsverður hluti mannfjöldans er ekki á svokölluðum vinnualdri og hefur því að öllum líkindum lægra tímavirði en hinir. Á þetta ekki hvað síst um börn og unglinga, en einnig að einhverju leyti eldra borgara. Að hinu ber þá jafnframt að gæta að þessir aldurshópar eru eflaust minna í umferðinni en hinir og verða því síður fyrir umferðartöfum. Um þetta er þó engar mælingar að því er við best vitum.

Í viðauka 5.A er útskýrt hvernig unnt er að taka tillit til atriða af þessu tagi. Eins og útskýrt er í viðaukanum má skoða slíkt tillit sem leiðréttingu metnu tímavirði. Nánar tiltekið getur slík leiðrétting verið:

$$(1) \quad \hat{p} = p \cdot \left(\frac{n_1 + \beta \cdot \alpha_2 \cdot n_2 + \beta \cdot \alpha_3 \cdot n_3}{n_1 + (n_2 + n_3) \cdot \beta} \right),$$

þar sem \hat{p} leiðrétta tímavirðið en p upphaflega matið. Í líkingu 1 er gert ráð fyrir þremur hópum, fólki á vinnualdri, ungra og aldraðra, sem táknaðir eru með vísunum 1, 2 og 3. Stærðirnar n_1 , n_2 og n_3 má skoða sem fjölda í hverjum hópi sem hlutfall af heildarfjöldanum. Stuðullinn β (≤ 1) táknar þátttöku hópa 2 og 3 í umferðinni og stuðlarnir α_2 og α_3 (≤ 1) hlutfallslegt tímavirði þeirra miðað við metna tímavirðið. Auðvelt er að ganga úr skugga um að sé $\alpha_2 = \alpha_3 = 1$, þ.e. tímavirði allra er eins, er $\hat{p} = p$.

Á höfuðborgarsvæðinu voru árið 2019 tæplega 79% mannfjöldans 17 ára og eldri og um 70% voru á aldrinum 17 til 70 ára. Sé gert ráð fyrir að $\alpha_2 = 0.1$ og $\alpha_3 = 0.5$, þ.e. tímavirði 16 ára og yngri 10% af metna tímavirðinu og tímavirði eldri en 70 ára 50% af metna tímavirðinu, og $\beta = 0.5$ er leiðrétta tímavirðið:

$$(2) \quad \hat{p} = p \cdot 0.863.$$

Með öðrum orðum leiðrétta tímavirðið er liðlega 86% af matinu í kafla 4.

Vongildi leiðrétta matsins verður þá 4400 kr./klst. með óvissubíli 2500-6200 kr./klst.

Rétt er að taka það fram að þessi leiðrétting á ekki við um matið á þjóðhagslega tímavirðinu sem fundið er á grundvelli landsframleiðslunnar.

5.2 Mat á kostnaði við umferðartafir

Á grundvelli þess sem að ofan er rakið má taka saman mögulegan einstaklingsbundinn kostnað við umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu líkt og gert er í töflu 5.1

Tafla 5.1 Mat á einstaklingsbundnum tafakostnaði í umferð á höfuðborgarsvæðinu á árinu 2019 (mia. kr. verðlag 2019)					
Tafatími m. klst/ári	Tímavirði þús. kr./klst.				
	2.5	3	4	5	6.2
9	22.5	27.0	36.0	45.0	55.8
12	30.0	36.0	48.0	60.0	74.4
15	37.5	45.0	60.0	75.0	93.0
18	45.0	54.0	72.0	90.0	111.6
20	50.0	60.0	80.0	100.0	124.0

Eins og sjá má spannar mögulegur kostnaður við umferðartafir mjög vítt bil eða frá 23 mia. kr. að 124 mia. kr. Líklegasta kostnaðarbilið er skyggðu reitirnir í miðri töflunni. Miðja þess bils er í námunda við 60 mia. kr.

Sem fyrr greinir er þjóðhagslegt tímavirði metið talsvert hærra en hið einstaklingsbundna eða á bilinu 6800 til 10200 kr./klst. Eins og rakið er í kafla 4 er helsta ástæðan þessa greiðslur skatta af atvinnutekjum sem einstaklingurinn skoðar vart sem sínar vinnutekjur en eru vissulega hluti af landsframleiðslunni. Á þessum grundvelli er unnt að meta þjóðhagslegan kostnað við umferðartafir á höfuðborgarsvæðinu eins og gert er í töflu 5.2.

Tafla 5.2 Mat á þjóðhagslegum tafakostnaði í umferð á höfuðborgarsvæðinu á árinu 2019 (mia. kr. verðlag 2019)					
Tafatími m. klst/ári	Tímavirði þús. kr./klst.				
	6.8	7.5	8.5	9.5	10.2
9	61.2	67.5	76.5	85.5	91.8
12	81.6	90.0	102.0	114.0	122.4
15	102.0	112.5	127.5	142.5	153.0
18	122.4	135.0	153.0	171.0	183.6
20	136.0	150.0	170.0	190.0	204.0

Mikilvægt er að átta sig á því að matið á þjóðhagslega kostnaðnum í töflu 5.2 er ekki mat á lækkun landsframleiðslunnar vegna umferðartafa. Matið í töflu 5.2 er þjóðhagslegur

kostnaður miðað við að þjóðhagslegur fórnarkostnaður tíma fyrir borgarana sé framlag vinnu þeirra til landsframleiðslunnar.

Tilvísanir

- Alþýðusamband Íslands. 2022. Greinargerð um launaþróun og framleiðni. Dagsett 8.2 2022.
- Bjarni Reynarsson. 2021. Þétting byggðar og viðhorf til borgarlínu. Erindi á málstofu SFA, Lögbergi HÍ, 9.12.2021. Sjá samgongurfyriralla.com.
- Cowi og Mannvit. 2020. Borgarlínan: Socioeconomic Analysis. Mannvit. Kópavogur.
- DeSerpa. A. 1971. A theory of the Economics of Time. *Economic Journal* 81:823-45.
- Dixit, A. 1976. *The theory of equilibrium growth*. Oxford University Press. UK.
- Elías B. Elíasson. 2021. Greining Umferðartafa.
- Fjármála- og efnahagsráðuneytið. 2021. Langtímahorfur í efnahagsmálum og opinberum fjármálum. Fjármála- og efnahagsráðuneytið maí 2021.
- Flynn, M. 1966. *Origins of the Industrial Revolution*. Longmans, London.
- Fosgerau, M. K. Hjort and S. Lyk-Jensen. 2007. *The Danish Value of Time Study: Final report*. Danmarks Transportforskning. Lyngby. Danmörk.
- Hagstofan. 2022. <https://www.hagstofa.is/>
- Intriligator, A.D. 1971. *Mathematical Optimization and Economic Theory*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs.
- Kuhn, H. and Tucker. A. 1951. *Nonlinear Programming*. In J Neyman (ed.) *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on mathematical Statistics and Probability*. University of California Press.
- Kuznets, S. 1966. *Economic Growth, Rate, Structure and Spread*. Yale University Press.
- Land-ráð. 2018. Ferðavenjur sumarið 2018. Skýrsla unnin fyrir Vegagerðina. Land-ráð október 2018.
- Layard, R. og S. Glaister 1994. Introduction. Í Layard, R. og S. Glaister (eds.). 1994. *Cost-Benefit Analysis*. 2nd. ed. Cambridge University Press. UK.
- Mackie, P, A. Fowkes, G. Whelan, J. Nellthorp, and J. Bates. 2003. *Value of travel time savings in the UK- summary report*. Report to the Department of Transport. Institute of Transport Studies. University of Leeds.
- Mannvit og Cowi. 2020. *Borgarlínan Socioeconomic Analysis*. Mannvit og Cowi. Kópavogur.
- MVA Consultancy, Institute of Transport Studies at Leeds University og Transport Studies Unit at Oxford University. 1994. *Time savings: Research into the value of time*. Í Layard, R. og S. Glaister (eds.). 1994. *Cost-Benefit Analysis*. 2nd. ed. Cambridge University Press. UK.
- North, D. 1958. Ocean Freight Rates and Economic Development 1730-1913. *Journal of Economic History*. 18: 537-55
- Pawson, E. 1979. *Transport and Development: Perspectives from Historical Geography*. *International Journal of Transport Economics*. 6:125-37.
- Pawson, E. 1979. *Transport and Development: Perspectives from Historical Geography*. *International Journal of Transport Economics*. 6:125-37.

- Pontryagin, L.S, V.S. Boltyanski, R.V. Gramkeldize and E.F. Mishchenko. 1962. The Mathematical Theory of Optimal Processes. Wiley, New York.
- Ragnar Árnason. 2021. Mat á tafakostnaði á höfuðborgarsvæðinu grundvelli fjölda bílferða. Minnisgrein um tafakostnað nr. 1.
- Rodrigue, J-P. 2020. The Geography of Transport Systems. (5th ed.). Routledge. New York.
- Rodrigue, J-P. Og T. Notteboom. 2020 Transportation and Economic Development. In Rodrigue, J-P. 2020. The Geography of Transport Systems. (5th ed.). Routledge. New York.
- Rodrigue, J-P. Og T. Notteboom. 2020 Transportation and Economic Development. In Rodrigue, J-P. 2020. The Geography of Transport Systems. (5th ed.). Routledge. New York.
- Rostow, W. 1971. The Stages of Economic Growth: A Non-communist Manifesto. 2nd ed. Cambridge University Press.
- Schumpeter, J. 1939. The Theory of Economic Development. Cambridge. Massachusetts.
- SI. 2018. Tafir kosta milljarða. Greining SI. Samtök iðnaðarins.
<https://www.si.is/frettasafn/umferdartaafir-kosta-milljarda>
- Small, K. 2012. Valuation of travel time. Economics of Transportation 1:2-14.
- Smith, A. 1776. An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations. Edition by E. Cannan 1977. University of Chicago Press, Chicago.
- Spanos, A. 1999. Probability Theory and Statistical Inference: Econometric Modeling with Observational Data. Cambridge University Press. UK
- TomTom. 2022. [tomtom.com/en_gb/traffic-index/reykjavik-traffic](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/reykjavik-traffic)
- TomTom 2022. https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/
- UNECE United Nations Economic Commission for Europe. 2022.
<https://w3.unece.org/SDG/en/Indicator?id=30>
- Varian, H. 1984. Microeconomic Theory. Second edition. W.W. Norton & Company. New York.
- VSÓ. 2017. Umferðarspá fyrir 2030 vegna svæðisskipulagsbreytingar. Forsendur og niðurstöður. September 2017. VSÓ Ráðgjöf. Reykjavík.
- Wardman, M, Chintakayala, VPK and De Jong, GC (2016) Values of travel time in Europe: Review and meta-analysis. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 94:93-111.
- Weisbrod, G. 2008. Models to Predict the Economic Development Impact of Transportation Projects: Historical Experience and New Applications. Annals of Regional Science. 42:519-543.
- White, V. 2016. Revised Departmental Guidance on Valuation of Travel Time in Economic Analysis. U.S. Department of Transportation. Office of the Secretary of Transportation
- Pórarinn Hjaltason. 2021. BRT-lite. Létt Borgarlína. Erindi á málstofu SfA, Lögbergi HÍ, 9.12.2021. Sjá samgongurfyriralla.com.

Viðaukar

Viðauki 2.A

Útleiðsla á líkingu (15) í meginmáli

Fyrir liggur hámarkaða Lagrange-fallið:

$$(A.1) \quad L^* = U(x^*, t_v^*, t_r^*, t_f^*, \phi \cdot t_f^*) + \lambda \cdot (y + w \cdot t_v^* - p \cdot x^*) + \mu \cdot (T - t_v^* - t_r^* - t_f^* - \phi \cdot t_f^*),$$

þar sem táknið * merkir að viðkomandi stærðir séu þær sem hámarka nytjafallið.

Nú blasir við að þessi hámarkuðu gildi eru almennt talað föll af ytri stærðum vandamáls (I) í megintexta. Á meðal þessara ytri stærða er ϕ . Diffnun á (A.1) með tilliti til ϕ gefur:

$$(A.2) \quad \frac{\partial L^*}{\partial \phi} = (U_x - \lambda \cdot p) \cdot \frac{\partial x}{\partial \phi} + (U_{t_v} + \lambda \cdot w - \mu) \cdot \frac{\partial t_v}{\partial \phi} + (U_{t_r} - \mu) \cdot \frac{\partial t_r}{\partial \phi} \\ + (U_{t_f} + U_{t_i} \cdot \phi - \mu(1 + \phi)) \cdot \frac{\partial t_f}{\partial \phi} + U_{t_i} \cdot t_f - \mu \cdot t_f$$

Nú eru fyrstu fjórir svigarnir á hægri hlið (A.2) allir núll samkvæmt nauðsynlegu skilyrðunum (I.2)-(I.5) í megintexta. Því er:

$$(A.3) \quad \frac{\partial L^*}{\partial \phi} = U_{t_i} \cdot t_f - \mu \cdot t_f,$$

sem er líking (15) í meginmáli.

Þessi útleiðsla á (A.3) er einungis dæmi um hina almennu umslagssetningu í hámarkunarfræðum (sjá t.d. Varian 1984).

Viðauki 2.B

Um val á ferðamáta

Gerum ráð fyrir því að fyrir hendi séu mismunandi ferðamátar við að komast á milli tveggja staða. Vísum til þessara ferðamáta sem $f(i)$, $i=1,2,..I$. Mengi ferðamáta er þá vektorinn

$$f=(f(1),f(2),\dots,f(I)).$$

Nú er ferðamáti notaður eða ekki. Látum $f(i)=1$ tákna að ferðamáti i sé notaður og $f(i)=0$ að hann sé ekki notaður. Mikilvægt er að hafa hugfast að eðli málsins samkvæmt þýðir $f(i)=1$ að $f(j)=0$, fyrir öll $j \neq i$.

Sérhver ferðamáti hefur í för með sér fjárhagsútlát, t.d. verð farmiða, kostnað við eigin farartæki, peningajafngildi áhættunnar o.s.frv. Ritum þennan kostnað sem vektorinn c .

Gerum nú ráð fyrir að aðili hafi ábata bæði af neyslu, x , og ferð milli ofangreindra staða og þeim ábata sé unnt að lýsa með eftirfarandi nytjafalli (e. utility function):

$$(B.1) \quad U(x, f),$$

þar sem x táknar magn neysluvara annarra en ferða.

Aðilinn vill auðvitað hámarka þetta nytjafall, en verður að taka tillit til hliðarskilyrðisins:

$$(i) \quad f(i) \in \{0,1\} \text{ og } f(i)=1 \Rightarrow f(j)=0, \text{ fyrir öll } j \neq i.$$

og tekjuskilyrðisins

$$(ii) \quad y - p \cdot x - \sum_{i=1}^I c(i) \cdot f(i),$$

þar sem y eru tekjur, p einingarverð neysluvara og $c(i)$ kostnaður við ferðamáta i .

Með hjálp tekjuskilyrðisins, (ii) er nú unnt að rita val ferðamáta sem ósamfellda hámarksvandamálið:

$$B.I \quad \text{Hám}_f U \left(\left(y - \sum_{i=1}^I c(i) \cdot f(i) \right) / p, f \right), \text{ þ.a. } f(i) \in \{0,1\} \text{ og } f(i)=1 \Rightarrow f(j)=0, \text{ fyrir öll } j \neq i.$$

Þá þarf ekki mikla umhugsun til að sjá að til að ferðamáti i sé valinn verður hann að fullnægja skilyrðunum:

$$B.I.1 \quad U \left(\left(y - c(i) \right) / p, f(i) \right) \geq U \left(\left(y - c(j) \right) / p, f(j) \right), \quad \forall j \neq i \text{ [hagkvæmasti ferðamáli]}$$

$$B.I.2 \quad U \left(\left(y - c(i) \right) / p, f(i) \right) \geq U \left(y / p, 0 \right) \quad \text{[hagkvæmt að fara í ferð]}$$

Fyrri skilyrðið, B.I.1 segir að til að ferðamáti i sé valinn verði hann að skapa meiri not fyrir viðkomandi en allir aðrir ferðamátar.

Viðauki 3.A

Notkun TomTom tafagildis til að meta umferðartafir

Umferðartafir á hverjum tíma, t eru margfeldi tafa á bílferð og fjölda bílferða, þ.e.

$$Taf(t) = taf(t) \cdot n(t),$$

þar sem $taf(t)$ er meðaltöl á bílferð á tíma t og $n(t)$ er fjöldi bílferða.

Miðað við ósamfelldan tíma er þá heildartafir yfir tímabil að lengd T

$$(A.1) \quad TAF(T) = \sum_{t=0}^T taf(t) \cdot n(t),$$

þar sem t er nú vísir sem táknar nú undirtímabil T . Því smærri sem vísirinn t er þeim mun nákvæmari verður líking (1) á heildartöfina.

Væru tímaraðirnar $taf(t)$ og $n(t)$ þekktar væri unnt að finna heildartöfina í (A.1). Gallinn er að þessi þekking er ekki fyrir hendi. Viðkomandi umferðarmælingar hafa einfaldlega ekki verið gerðar. Þær mælingar sem fyrir liggja eru um fjölda bílferða á dag að meðaltali og fyrrgreind TomTom tafagildi, sem eru metin á klukkustunda fresti. Miðað við þessi gögn gæti verið freistandi að meta heildartöl á dag sem:

$$(A.2) \quad \hat{TAF} = \bar{taf} \cdot \bar{n},$$

þar sem \bar{taf} táknar meðaltafagildi samkvæmt TomTom mælingu, \bar{n} meðalfjöldi bílferða á dag og \hat{TAF} táknar metnar tafir á dag. Þessi matsaðferð felur hins vegar næstum alltaf í sér verulega skekkju. Grunnástæðan er sú að tímaraðirnar tvær; $taf(t)$ og $n(t)$ eru ekki óháðar hvor annarri. Þvert á móti virðist augljóst að þegar $n(t)$ er há tala er $taf(t)$ einnig há tala.

Sambreytileiki (e. covariance) raðanna $taf(t)$ og $n(t)$ er samkvæmt skýrgreiningu:

$$(A.3) \quad Cov(taf, n) = E((taf - E(taf))(n - E(n))),$$

þar sem $E(\cdot)$ er svokallaður vongildisgjörvi (e. expectations operator).

Með hjálp eiginleika vongildisgjörvans²⁶ sýnir einföld algebra að hægri hlið (A.3) má rita:

$$Cov(taf, n) = E(taf \cdot n) - E(taf) \cdot E(n).$$

Því er vongildi heildartafa

$$(A.4) \quad E(taf \cdot n) = E(taf) \cdot E(n) + Cov(taf, n).$$

²⁶ Vongildisgjörvinn er línuleg aðgerð, þ.e. $E(x+y) = E(x) + E(y)$, sjá t.d. Spanos (2000).

Með öðrum orðum vongildi heildartafar er margfeldi vongildanna (meðaltalanna) af tötum á bílferð, taf , og fjölda bílferða, n , að viðbættum sambreytileika þessara stærða. Því er það að ef sambreytileikinn er jákvæður mun margfeldi vongildanna vanmeta heildartöfina.

Með hjálp einfaldrar algebru og skýrgreininga á tölfræðihugtökum, má rita líkingu (A.4) sem:

$$\begin{aligned}
 E(taf \cdot n) &= E(taf) \cdot E(n) \cdot \left(1 + \frac{Cov(taf, n)}{E(taf) \cdot E(n)} \right) \\
 (A.5) \quad &= E(taf) \cdot E(n) \cdot \left(1 + \frac{Cov(taf, n)}{Sdev(taf) \cdot Sdev(n)} \cdot \frac{Sdev(taf)}{E(taf)} \cdot \frac{Sdev(n)}{E(n)} \right), \\
 &= E(taf) \cdot E(n) \cdot (1 + Cor(taf, n) \cdot Cvar(taf) \cdot Cvar(n))
 \end{aligned}$$

þar sem $Cor(taf, n)$ táknar fylgnina (e. correlation) milli taf og n , $Sdev(z)$ er staðalfrávik (e. standard deviation) z og $Cvar(z)$ er svokallaður breytileikastuðull (coefficient of variation) fyrir z .

Nú er fjöldi bílferða og tafir auðvitað nátengdar. Töluleg greining og hermun (e. simulation) bendir til að fylgnin þar má milli sé líklega ekki mikið undir einum Hinar miklu sveiflur í tötum og fjölda bílferða benda jafnframt til þess að viðkomandi breytileikastuðlar geti verið háir og hæglega vel yfir einum. Niðurstaðan er því að svigastærðin í (A.5) sé örugglega langt yfir einum og gæti jafnvel verið yfir tveimur. Varlegt mat er að hún sé á bilinu 1,7 til 2,0.

Viðauki 3.B

Fjöldi bílferða á höfuðborgarsvæðinu

Samkvæmt Hagstofu Íslands var íbúatala og bílaeign á árinu 2019 sem lýst er í töflu B.1.

Tafla B.1 Íbúatala og fjöldi bifreiða á höfuðborgarsvæðinu 2019	
Íbúatala (þús.)	233.034
Fjöldi einkabifreiða (þús.)	173.843
Fjöldi annarra bifreiða (þús.)	28.794

Aðrar bifreiðar eru að líkindum fyrst og fremst atvinnubifreiðar af ýmsu tagi. Lítið brot af þeirri tölu eru væntanlega strætisvagnar.

Í VSÓ 2017 kemur fram (bls. 12) að samkvæmt ferðavenjukönnunum 2002, 2011 og 2014 hafi fjöldi ferða með einkabifreið verið nokkuð stöðugur eða 4,2 til 4,3 ferðir á sólarhring á hvern íbúa. Þar sem iðulega eru farþegar í bílferð auk bílstjóra er sá fjöldi bifreiða sem ferðist um götur höfuðborgarsvæðisins á hverjum sólarhring nokkru lægri en fjöldi bílferða einstaklinga einungis eða um 80% af ferðum með einkabifreið.

Á grundvelli þessara gagna er unnt að reikna heildarfjölda bílferða einstaklinga og ferða einkabifreiða á höfuðborgarsvæðinu árið 2019. Niðurstöðurnar eru raktar í töflu B.2.

Tafla B.2 Fjöldi ferða í einkabíl á höfuðborgarsvæðinu 2019			
	Gögn	Reiknað	Notuð tala
Einstaklingsferðir í einkabíl (þús./sólarhring)	4,1 ferð/íbúa	955.439	950.000
Fjöldi ferða einkabifreiða (þús./sólarhring)	80% ferða	764.352	760.000

Samkvæmt niðurstöðunum í töflu B.2 er fjöldi einstaklingsferða í einkabifreiðum líðlega 955 þús./sólarhring og fjöldi ferða einkabifreiða um göturnar tæplega 765 þús./sólarhring. Tölurnar í fjórða dálki töflunnar eru þær sem notaðar eru í reikningum skýrslunnar.

Rétt er að taka það skýrt fram að heildarfjöldi bílferða um höfuðborgarsvæðið er talsvert meiri en ferðir einkabifreiða þar sem atvinnubifreiða eru þar einnig á ferðinni. Eins og fram kemur í töflu B.1 eru atvinnubifreiðar u.þ.b. 16% af fjölda einkabifreiða og þar sem ætla má að ferðatíðni þeirra sé talsvert meiri en einkabifreiðanna er það varlegt mat að ofangreindar tölur um fjölda ferða einkabifreiða um höfuðborgarsvæðið feli í sér 20% vanmat á heildarfjölda ferða.

Síðara skilyrðið, B.I.2 segir að til þess að farið sé í ferðina verði hagkvæmasti ferðamátinn verður að skapa meiri not en engin ferð.

Greiningin hér að ofan sýnir að hvort farið er í ferð eða ekki og val ferðamáta eru ósamfelld föll af aðstæðum. Þetta eru ósamfelld föll í þeim skilningi að aðilar geta haldið sig við sama ferðamáta lengi vel þótt hann verði æ óhagkvæmari. Þegar ákveðnu marki er náð er hins vegar stokkið á annan ferðamáta eða jafnvel hætt við að leggja í ferðina.

Þetta gildir auðvitað líka fyrir ferðatíma og þægindi mismunandi ferðamáta. Þótt ferðatími vaxi t.d. vegna umferðartafa eða þægindi við annan ferðamáta fari vaxandi geta viðkomandi lengi vel haldið áfram að nota sama ferðamáta. Þetta sýnir að notabilið milli mismunandi ferðamáta getur skipt miklu máli fyrir það hvort breytingar í eiginleikum ferða fái aðila til að skipta um ferðamáta.

Viðauki 5.A

Mismunandi hópar í umferðinni

Í fyrri köflum þessarar skýrslu var sett kom fram mat á tafatíma og tímavirði. Samkvæmt því er tafakostnaður fyrir alla landsmenn

$$(A.1) \quad TK = T \cdot N \cdot p,$$

þar sem T táknar mat á tímatöf á vegfaranda, N fjölda vegfarenda og p tímavirði hvers þeirra.

Matið á T og p er meðalgildi fyrir alla vegfarendur. Hins vegar blasir við að sumir landsmenn þeirra minna tímavirði en aðrir, t.d. börn og unglingar og eldri borgarar og sömu hópar verða að líkindum einnig fyrir minni töfum í umferðinni Þetta getur krafist vissrar leiðréttingar á ofangreindu mati. Um þá leiðréttingu verður grafið nánar í þessum viðauka.

Skiptum vegfarendum í þrjá hópa. Látum fjölda í hverjum hópnum vera n_1 , n_2 og n_3 . Þá má rita tafakostnað í heild sem:

$$(A.2) \quad TK = T_1 \cdot p_1 \cdot n_1 + T_2 \cdot p_2 \cdot n_2 + T_3 \cdot p_3 \cdot n_3,$$

þar sem T_i táknar tafatíma á mann og p_i tímavirði í hóp i .

Gerum nú ráð fyrir að tímavirði hópnum þriggja sé:

$$\begin{aligned} p_1 &= P, \\ p_2 &= \alpha_2 \cdot P, \\ p_3 &= \alpha_3 \cdot P, \end{aligned}$$

þar sem $\alpha_2, \alpha_3 \in [0, 1]$.

Og tafatími hópnum 2 og 3 sé

$$\begin{aligned} T_2 &= \beta \cdot T_1, \\ T_3 &= \beta \cdot T_1, \end{aligned}$$

þar sem $\beta \in [0, 1]$.

Nú er það svo að metinn tafatími á vegfaranda er vegið meðaltal tafatíma allra hópnum. M.ö.o.

$$(A.3) \quad \frac{n_1}{N} \cdot T_1 + \frac{n_2}{N} \cdot T_2 + \frac{n_3}{N} \cdot T_3 = T.$$

Innsetning fyrir T_2 og T_3 leiðir þá til eftirfarandi líkingar fyrir T_1

$$(A.4) \quad T_1 = \frac{T \cdot N}{(n_1 + (n_2 + n_3) \cdot \beta)}.$$

*

M.ö.o. T_1 vex eftir því sem hinir hóparnir verða fyrir minni tölum. Það er auðvitað vegna þess að matið á meðaltafatíma, T , er fyrir alla hópana í heild.

Innsetning fyrir T_1 í (A.2) og lítilsháttar umskrift gefur nú:

$$(A.5) \quad TK = T \cdot N \cdot p \cdot \left(\frac{n_1 + \beta \cdot \alpha_2 \cdot n_2 + \beta \cdot \alpha_3 \cdot n_3}{n_1 + (n_2 + n_3) \cdot \beta} \right).$$

Svigastærðin í (A.5) er leiðréttingin vegna þess að hóparnir eru ólíkir hvað snertir tafatíma og tímavirði. Auðvelt er að ganga úr skugga um að séu hóparnir eins að þessu leyti, þ.e. $\alpha_2 = \alpha_3 = \beta = 1$, verður líking (A.5) eins og líking (A.1).

Leiðréttingarsvigann í (A.5) má skoða sem leiðréttingu á metna tímavirðið, þ.e.

$$(A.6) \quad \hat{p} = p \cdot \left(\frac{p_1 \cdot n_1 + \beta \cdot \alpha_2 \cdot n_2 + \beta \cdot \alpha_3 \cdot n_3}{n_1 + (n_2 + n_3) \cdot \beta} \right),$$

þar sem \hat{p} er leiðréttu tímavirðið. Auðvelt er að sjá að sé $\alpha_2 = \alpha_3 = 1$, þ.e. tímavirði allra er eins, er $\hat{p} = p$.