

城市交通“战略技术经济模型”(STEM) ——巴黎大区交通政策探索

Urban Transport "Strategic Technical Economic Model"—Parisian Region's Transport Policy Exploration

李 盛

法国ENPC/LVMT研究员

摘要： 城市交通的投资和管理是交通决策的重大问题，如何在不同的供给、需求结构下，制定合理可行、与时俱进的交通政策是管理者需长期面对的课题。交通系统管治的内涵因城市发展阶段而变化，但究其理论根本是使边际出行在各种出行方式中所造成的社会成本的增量相等。STEM(Strategic Technical-Economic Model)模型为决策提供了这样一个理论和操作工具，并以此为基础模拟了巴黎大区的几项交通政策。交通税费的合理配置能够有效缩减私人成本和社会成本的分离，使出行消耗的社会资源内部化，从而实现城市交通系统的最优运行。

关键词： 交通系统管治；边际社会成本；环境成本；交通拥堵费

Abstract: The investment and management of urban transportation is a major issue in transportation decision-making. How to establish a reasonable and feasible transport policy under different supply and demand structures is a topic that managers must face for a long time. The connotation of transportation governance evolves due to the stage of urban development, but it is fundamental to equalize the incremental increase in social costs brought by marginal travel in various modes. STEM (Strategic Technical Economic Model) provides such a theoretical and operational tool for decision-making and simulates several policy directions for the Parisian Region. The reasonable specification of transportation taxes and fees can effectively reduce the separation of private costs and social costs, and internalize the social resources consumed by travel, so as to achieve an optimal operation of the urban transportation system.

Keywords: Systemic transport regulation; Marginal social cost; Environmental cost; Urban congestion fee

1 综 述

城市交通系统的形成是在既有体系的基础上，由供需合力引导的发展过程。这种合力通过运输市场中的个体选择行为以及公共干预共同起作用。公共干预可以为主动，亦可为被动，实际中则常兼而有之。干预的基本方式，即广义的交通规划，是对土地、公共财政、人员以及相应税费的统一安排，以达到人、物运输的最优

状态。本文给出一种指导规划的、建立在对交通相关方损益分析基础上的宏观理论框架：方法融合交通系统的技术建模和经济分析，因此谓之战略技术经济模型（Strategic Technical-Economic Model）。模型将处理三个层次的资源优化配置问题以达系统最优运行：公交系统和道路网间、公交各子方式间以及在每个子方式中的经济要素分配。交通系统管治意味着通过对不同子系统的投资、组织及定价使需求在其间最优分配。

作者简介

李盛（1979—），男，法国国立路桥大学（ENPC）工学博士。ENPC/LVMT研究员，研究方向为交通经济。
Email:sheng.li@enpc.fr

如何最佳利用既有设施，也即在给定交通系统中分配需求的研究可以上溯到1920年Pigou提出的两条服务水平、阻抗不同的道路上分配交通流的问题，最优状态为边际车辆给两条路引起的社会成本增量相等的一点。此后Knight（1924）提出道路的产权私有化能够使得这种社会成本内部化，从而达到社会最优；他的学生Buchanan（1956）论证了在道路系统这种公共资源中，使用权难以界定的特性（行车速度不仅取决于自身，更取决于车队）推论出Knight条件的不足。

战后，关于公共交通和道路网的优化分别推进。Holroyd（1967）用分析方法开始讨论通过最小化总成本来优化巴士组织，Mohring（1972）发现了公共交通中供给密度与规模效应之间的关联。道路网络方面，关于投资规模和道路收费问题相继被Strotz（1956），Kraus（1981）以及Arnott et al.（1993）等讨论过。从Vickrey（1965）开始，两种主要交通方式的替代效应以及价格杠杆对这种分配的影响被讨论。随后McFadden（1973，1974）证明了反映离散选择行为的Logit模型，Small et al.（1981）进一步地给出多种方式竞争下度量消费者盈余的函数，为交通系统管治提供了理论起点。

1970年代的石油危机以及环境、气候的恶化问题引起了对于交通排污和资源消耗的关注。Verhoef（1994）将交通的外部效应分类并将对策的影响放在研究中，De Borger（1997）与Proost（2001）分析了在不同的经济杠杆作用下包含污染的社会福利水平的变动，交通出行引发的社会成本被拓展到环境领域。

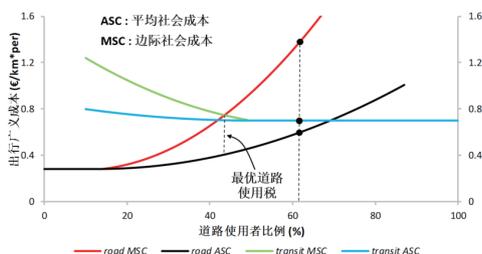


图1 道路网、公交系统竞争下的边际私人、社会成本

虽然城市交通网络较百年前，变得更为庞杂与相互依赖，OD的组成更为多样，但面临的理论问题是相似的，即在各种约束下如何分配社会资源和需求使得边际出行带来社会成本的增量在各个方式中是相同的。图1给出公共交通与道路网络并存的条件下，有、无公共干预的需求分配的状态：在缺乏系统管治的情况下（右侧均衡），道路网络在拥堵条件下新增车辆造成的边际社会资源的消耗要远大于公共交通系统，而只有通过对其征收合理的税费才能将私人行车成本置于公共交通之上而达到社会最优（左侧均衡），收取的费用作为公共财政通过不同方式反馈给社会。

2 理论框架

在城市交通系统中如图2所示，出行相关主体大致可分为出行者、运营商、环境以及政府。政府和运营商通过交通设施和服务的组织，提供公交与道路两种基本供给；出行者根据两种方式的广义出行成本来选择符合偏好的最经济的出行方式，进而达到供需平衡。在这种平衡下，每个子系统的运行状况以及承担的交通量，导出排污量以及污染的货币成本，这种成本反加在用户上构成福利水平的损失。出行者付出的货币成本即运营商的收入，与供给所付出的成本之差为运营商盈利。现实世界中，运营商盈利通常为负，赤字需要政府的补贴来维持运行。用户将交通系统的服务水平以及受到的污染反馈给政府，同时运营商将运营状况反馈给政府作为补贴要求的依据之一。在接受反馈的基础上，政府动用投资、税费以及规则等杠杆来调节系统运行以达到社会最优的目的。

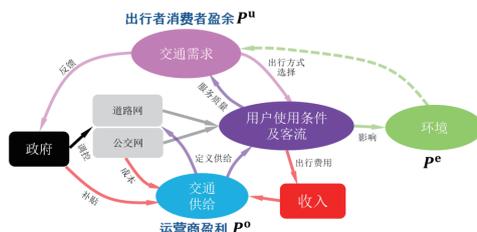


图2 城市交通系统的运行及福利函数

$$P^u = \sum_{i \in I} (P_i^{uF} + P_i^{uD}) = \sum_{i \in I} (Q_i^F \cdot \frac{1}{\theta} \ln(\exp(-\theta g_i^{TF}) + \exp(-\theta g_i^{CF})) - Q_i^{TD} \cdot g_i^{TD} - Q_i^{CD} \cdot g_i^{CD}) \quad (1)$$

$$P^o = \sum_{i \in I} \tau_i^T (Q_i^{TF} + Q_i^{TD}) - c^{oT} + \sum_{i \in I} \tau_i^C (\hat{Q}_{z,i}^{CF} D_{z,i}^F + \hat{Q}_{z,i}^{CD} D_{z,i}^D) - c^{oC} \quad (2)$$

$$P^e = \sum_{z \in Z} P^{eC}(Q_z^+, v_z) + \sum_{r \in R} P^{eT}(N_r, v_r) \quad (3)$$

以上三式解释了出行相关方的效用函数：式(1)中出行者的消费者盈余为选择型用户的logsum函数与依赖型用户的广义成本之和；式(2)中运营商的盈利表达为公交、道路系统的整体收益与为之承担的成本之差；式(3)污染函数由道路、公交两系统的排污量共同定义。

系统优化的目标是运输一定的需求使社会整体承受的所有成本之和最小，换言之消耗的社会资源最少，目标函数为出行相关方效用函数的加权之和：

$$W0 = \alpha P^u + \beta P^o + \gamma P^e \quad (4)$$

$$W1 = \alpha P^u + \beta P^o \quad (5)$$

$$P^o + S \geq 0 \quad (6)$$

由此确立了两种优化政策，W1是只包含供需的福利函数，W0是包含了环境影响的完全福利函数。两者都须遵从的约束(6)是，运营商的赤字(P⁰)能够被得到的补贴(S)所覆盖。

出行者、运营商与环境的权重取决于城市发展的阶段，例如非洲多数城市处于工业化发端，对改善出行及货物可达性的要求较为迫切，而对环境影响不甚敏感；然而上海、北京、深圳等后工业化的城市对于环境的要求是非常高的；一些欧洲国家或者是地方财政陷入了债务危机，他们对于约束公共开支较为看重。在上式中以α, β, γ表征它们在目标函数中的权重，本研究中α=β=γ=1。

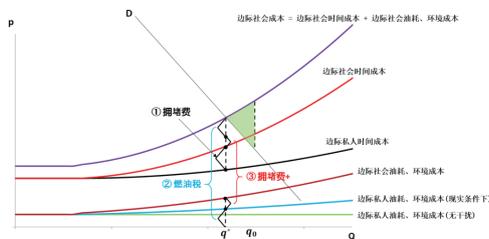


图3 行车的社会成本解析

目标函数的求解就是将外部成本内部化后的优化过程。其中道路网的外部成本包含三个层次：

① 边际车辆加入车队使得其他车辆速度下降，造成行程时间增加所带来的成本增量之和；

② 边际车辆自身运转带来的噪声、大气污染、温室气体排放的危害；

③ 边际车辆使得车队速度下降的这一事实，引发的其他车辆油耗和污染增加的成本。

由图3可知道路网使用的社会成本远大于私人成本，在外部成本内部化后，最优状态产生的道路网络使用费为两成本之差。由于城市中拥堵区域、拥堵时段的分布是极其不均匀的，这种内部化的过程会带来时空差异。

3 模型

3.1 交通供给

2000年以来，出行的演变与运输市场的去管制趋势促进了需求和供给的多样化。在先进的信息服务和智能手机普及的背景下，新的出行方式不断涌现。但目前，道路网络和公共交通仍然承担着城市出行的绝大部分，以2010年的巴黎大区为例，95.1%的交通量仍由这两种主要方式所承担。

模型采用集计方法来描述供需。巴黎大区按照人口密度可分为三个子区域，以集合Z来表示。交通系统分为两类：公共交通系统的网络通过子系统集合R来描述，由区域划分集合Z与交通方式m（Bus, Metro, RER, Transilien）交叉定义；道路子网络通过集合Z来描述，与区域划分重合，使用相同标识。

3.1.1 公交系统服务水平

每一个子系统用三个变量来表征：线网长度L_r，站点数量σ_r以及车队规模N_r。外生变量η_r为车队动员率，即高峰时段在系统中运营的车辆数与车队规模的比值，反映

调度水平。在每个子系统 r 内,假设线网、站点以及车辆皆均匀分布,车辆在网络中均匀运行,则公共交通子系统的服务水平可表示为:

$$S_r = L_r / \sigma_r \quad (7a)$$

$$1/v_r = 1/V_r + \omega_r / S_r \quad (7b)$$

$$\varphi_r = \eta_r N_r v_r / 2L_r \quad (7c)$$

$$d_r^{A,D} = \frac{1}{4}(S_r + \chi_z A_z / L_r) \quad (7d)$$

公交系统的运营成本由两部分组成,一部分为设施和车辆投入的固定成本,另一部分是和乘客数量成线性关系的可变成本。

$$c_r^o = c_r^L \cdot L_r + c_r^\sigma \cdot \sigma_r + c_r^N \cdot N_r \quad (8a)$$

$$c^o = c_0^o \cdot Q^T + (\sum_{r \in R} c_r^o) / Y \quad (8b)$$

3.1.2 道路网服务水平

对于道路网,当进入流率(q_z^+)小于网络的最优流率(q_z^*)时,排出流率(q_z^-)与进入流率相等,子网的服务水平即平均速度直接由MFD(Macroscopic Fundamental Diagramme)函数来给出;当进入流率大于网络最优流率时,意味着道路将出现拥堵及排队,延误增加的同时排出流率也随之减小,这时的网络平均速度由MFD函数与瓶颈效应联合给出:

$$R(v_z) = \omega_z \ln(v_0/v_z) \quad (9a)$$

$$q_z^- = v_z R(v_z) \quad (9b)$$

$$v_z = (q_z^+ H_1 / R(v_z) - 2u_z) / (H_1 - 2u_z / v_z^*) \quad (9c)$$

3.2 交通需求

3.2.1 用户分类

为区分用户的出行特征和选择行为的不同,将出行需求按照出行距离、OD以及是否穿越中心城区分为21对出行束(I)。

每对出行束都分为方式依赖者与方式选择者两类:方式依赖者(D)由于不具备某些条件而不得不依赖一类出行方式的用户,如不具备驾照或者车辆的用户只能采用公共交通出行;在远郊,公共交通供给非常稀疏的区域居民则依赖小汽车出行,以上用户无论交通系统作何调整,他们的出行行为在短期内很难改变。而自由选择出行方式的用户(F)的行为则取决于两种方

式的相对服务水平:

$$Q_i^{TF} = Q_i^F \cdot \exp(-\theta g_i^{TF}) / (\exp(-\theta g_i^{TF}) + \exp(-\theta g_i^{CF})) \quad (10a)$$

$$Q_i^{CF} = Q_i^F - Q_i^{TF} \quad (10b)$$

3.2.2 用户的广义出行成本

在交通系统服务水平给定的条件下,公共交通用户的广义出行成本由货币成本及时间成本两部分构成:时间包括车站到出发地(目的地)的衔接时间、等待时间、车内时间以及换乘的时间损失,各类时间通过时间价值与惩罚因子转化成货币成本。

$$g_i^{TF} = \tau_i^T + E_i^{TF} + \sum_{r \in R} (E_{r,i}^{A,EF} \cdot d_r^{A,E} + E_{r,i}^{M,F} / 2\varphi_r + E_{r,i}^{R,F} T v_r) \quad (11a)$$

道路用户的广义出行成本由停车费用,车辆的损耗费用(与行车距离线性相关的函数,包含购置、保险、维护等等),时间成本以及道路税费组成。

$$g_i^{CF} = F_i + \tau_i^C + \sum_z D_{z,i}^F \cdot (\beta_t T v_z + \beta_c) \quad (11b)$$

3.3 环境影响货币化

环境影响的货币化由三个因素决定:1)交通系统中车辆的排污量;2)排放地的污染受众密度;3)排放地的环境存量。排污量与系统的服务水平和流量共同决定,后两个因素与排放地的人口密度与环境脆弱度相关。根据这一原则,环境成本可由下面的公式给出:

$$P^{eT} = -\sum_{r \in R} \alpha_{1r} \cdot H_r \eta_r v_r N_r \quad (12a)$$

$$P^{eC} = -\sum_{z \in Z} \alpha_{2z} \cdot Q_z^+ - \sum_{z \in Z} \alpha_3 \cdot (\delta_1 v_z^2 + \delta_2 v_z + \delta_3) \quad (12b)$$

4 巴黎大区交通政策探索

城市交通政策根据优化变量(调整对象)可分为以下几种类型:①道路网络与公交线网;②公共交通车型、容量选择及车队规模;③交通税费;④区域车型管制;⑤公共采购及促使私有车辆升级的经济激励。本研究只处理三类交通政策:

①经济杠杆

②公交系统的短期优化,对车队规模

表1 交通政策模拟方案

优化类别	方案编号	政策内容	优化变量	补贴水平	目标函数	期限
1/经济杠杆	1	公交全免费	$\tau_i^T = 0$	不固定		当前
	2	燃油税上涨7c€/l	β_c	"		"
	3	巴黎中心区拥堵费	τ_i^C	"	W1	"
	4	巴黎中心区拥堵费	τ_i^C	"	W0	"
2/短期优化	5	公共交通系统优化	N_r, τ_i^T	固定	W1	短期
	6	"	"	"	W0	"
	7	"	"	不固定	W1	"
	8	"	"	"	W0	"
3/长期优化	9	"	$L_r, \sigma_r, N_r, \tau_i^T$	固定	W1	长期
	10	"	"	"	W0	"
	11	"	"	不固定	W1	"
	12	"	"	"	W0	"

及费用

③公交系统的长期优化，对设施、车队规模及费用

4.1 经济杠杆

模拟建立在参考年2010年基础上。巴黎大区居民全年共投入金钱和时间共计570亿欧元在出行中，相当于当年国内生产总值的十分之一。而政府对公交系统的补贴和环境成本都为55亿欧元左右。

公交全免费计划①使用户和环境的利益得到显著提升，其中有4.3%的道路用户转移使用公共交通。这种效益除来自转移交通及公交出行成本降低之外，还来自于道路网络负荷减轻而使行驶条件的提升。但同时，此计划需要的财政缺口相当于每户每年新增500欧元的税收，实质是高收入和低收入人群来补贴中等收入人群，因为前者与一直享受低价票证的后者的公交支出都难以达此数目。

燃油税上涨的计划②，引发了一场长达4个月的骚乱，损失严重。模型指出这项计划能够为大区带来每年约4亿欧元的公共财政，但由于不能区分拥堵的区域和时段，因而并不能达成政府所宣称的改善环境的初衷。

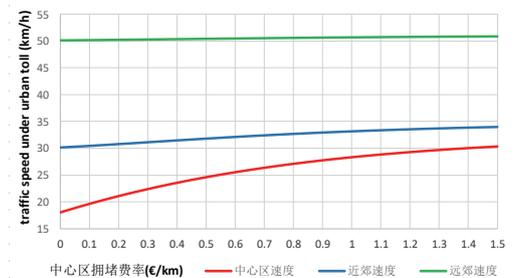
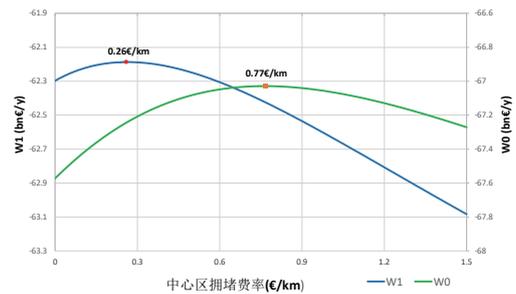


图4 中心区拥堵费优化

中心区拥堵费3/4)的提案显著地改善了环境质量，这项政策提高了中心区的驾车成本，使得出行选择扭曲得到了一定程度的缓解，因而虽然替代的交通量仅为2%~5%，但能做到有的放矢：中心区的交通量减少10%~30%。目前设置中心区拥堵费的技术手段、壁垒较以往已大大降低，核心问题是获取的每年10亿欧元的公共财政将如何使用，以及给民众合理的政策说

明。将其投入到公共交通中，或替代某些税种，或直接返还给用户，都是值得研究的选项。

交通拥堵费优化的结果给出了26到77欧分的合理收费区间，前者是只考虑供需，后者是综合考虑环境影响得到的最优解。在这个区间内，随着单位费用的上升，公共财政和环境的利益进一步得到加强，在77欧分这个水平，二者的边际收益恰与用户的边际损失相等。由 $W0$ ， $W1$ 产生的区间宽度接近目前小汽车的平均环境成本（0.55欧元/车公里）。

在77欧分的收费水平下，巴黎中心区内的行车速度从目前的18公里/小时上升到27公里/小时。环境效益来自于一部分用户转移使用公共交通而使道路交通量的减少，以及道路行车速度的改善。

4.2 公交优化

对于公交系统优化的方案，在短期内社会福利将被改善1.8%，即12亿欧元每年，相当于每户每年300欧元的额外收入，环境相当于用户效益的三分之一强。短期内设施不能变更，模拟结果显示，改善策略为转移巴黎的巴士车队来加强郊区的发车频率，不足部分由消减轨道的支出来填补。

如果设施在长期可以调整，社会福利的提高为短期的三倍，同时环境效益提升一倍。这时财政更倾向于通过增加设施来加强站点的可达性，同时减少对运载工具的投入。长期来看，轨道交通的三种方式，线网和站点的密度都同时得到了加强，而发车频率略微地降低，提示如果线网结构难以改变，可通过新的交通方式、合乘或者提供P+R服务等更为现实、可行的措施加强最后一公里的出行质量。巴士网络的密度却降低了50%以上，而发车频率得到了加强，提示应该重组公交线网，合并一些支线，加强主线。巴黎中心区的传统巴士作为一种高污染的模式而得到抑制，而替代选项地铁密度是较高的。

比较同一方案下环境标准带来的优化

结果的差异发现，15~20%的环境效益差异来自于公交系统间不同的运载工具的投入分配，这时在中心区的尤其是巴士的数量被削减，而大运量的交通方式得以加强。

如果放开补贴水平的约束，整体的福利（ $W0$ ， $W1$ ）变化很微小，但用户的效益（ P^u ）和运营商的赤字（ $-P^o$ ）均猛增，建议用更大的补贴来支持低票价模式。以社会福利的增量与增加的公共财政作比，得出一个边际公共支出的收益率，也就是政府多支出单位货币创造的社会福利，当这个比率小于1.2也就是公共财政的机会成本时，这份支出就应该优先考虑被使用到其他更有效率的项目中。长期优化的结果约为1.08，从另一面说明大巴黎目前的公共交通的补贴水平是合理的。

4.3 平均运输成本与环境成本

模型给出了平均运输成本和平均环境成本，并将公交方式与路网之间的指标进行比较。

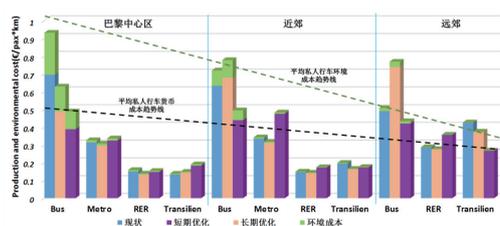


图5 平均运输成本与平均环境成本

在远期，运输每乘客公里，巴士要付出40欧分的代价，地铁要付出30到40欧分，而轻轨在中心区和近郊区是15欧分，远郊区则为30欧分，此时成本接近远郊的私人汽车成本。优化前后变化幅度较大的是巴士，通过线网的压缩和发车频率的减弱，使得车辆的装载率提高从而提高运输效率。

环境成本中，轨道交通由于采用电力作为主要能源，环境成本主要来源是噪音与温室气体排放，大致在1欧分/乘客公里左右。而巴士在巴黎中心区以及近郊大概是10欧分和6欧分，与小汽车的50和20欧分比来说，具有显著的环境优势。大巴黎正在进行车辆改造计划，在未来5年中，80%的

巴士要更换为混合动力或全电力车辆，可减少很多污染源。

5 结论

通过模型的演绎以及巴黎大区政策的模拟结果可以得出，要对城市交通政策进行评估，需要对几种主要交通方式之间的竞争以及用户群体的替代特性作整体分析，综合出行相关方的各种成本与收益，对交通系统管治提供定量依据。

目前最大的出行选择扭曲来源于道路行车私人成本与社会成本的分离。城市道路的建设维护费用应由以燃油税和地方税为主的结构，向与行驶状态挂钩的计量方式转变，保证道路资源的有效分配，使其逼近“使用者付费”（社会成本）的原则，其中采用的交通科技应能维持较低的管理和交易成本。

高密度中心区内由于单位排污的环境影响成本高昂，可以弥补新能源车型的投资成本。

在公交发展新阶段，轨道交通的接驳如能通过新交通方式进行会大大提高公共交通的吸引力，常规公交可以继续服务远郊的点对点出行。公交系统的票制票价的改革还期待机制方面的进步，以持续降低公共交通出行的货币成本，从另一面纠正选择扭曲。

参考文献

- [1] Arnott, R., Kraus, M., 1993. The Ramsey problem for congestible facilities. *Journal of Public Economics*, 50(3), 371-396.
- [2] Buchanan, J. M., 1956. Private ownership and common usage: The road case re-examined. *Southern Economic Journal*, 305-316.
- [3] De Borger, B., Ochelen, S., Proost, S., Swysen, D., 1997. Alternative transport pricing and regulation policies: a welfare analysis for Belgium in 2005. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 177-198.
- [4] Holroyd, E. M., 1967. The optimum bus service: a theoretical model for a large uniform urban area. In *Proceedings of the Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Operations Research Society of America*.
- [5] Knight, F. H., 1924. Some fallacies in the interpretation of social cost. *The Quarterly Journal of Economics*, 38(4), 582-606.
- [6] Kraus, M., 1981. Scale economies analysis for urban highway networks. *Journal of Urban Economics*, 9(1), 1-22.
- [7] Leurent, F., Li, S., Badia, H., 2019. Structural design of a hierarchical urban transit network integrating modal choice and environmental impacts. *Transportation Research Procedia*, 37, 99-106.
- [8] McFadden, D., 1973. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior.
- [9] McFadden, D., 1974. The measurement of urban travel demand. *Journal of public economics*, 3(4), 303-328.
- [10] Mohring, H., 1972. Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review*, 62(4), 591-604
- [11] Pigou A. C., 1920. *The Economics of Welfare*, 1st ed. Macmillan, London, England.
- [12] Proost, S., Van Dender, K., 2001. The welfare impacts of alternative policies to address atmospheric pollution in urban road transport. *Regional Science and Urban Economics*, 31(4), 383-411.
- [13] Small, K. A., Rosen, H. S., 1981. Applied welfare economics with discrete choice models. *Econometrica (pre-1986)*, 49(1), 105.
- [14] Strotz, R. H., 1965. Urban transportation parables. *The public economy of urban communities*, 127-169.
- [15] Verhoef, E., 1994. External effects and social costs of road transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 28(4), 273-287.
- [16] Vickrey, W., 1965. Pricing as a tool in coordination of local transportation. In *Transportation economics* (pp. 275-296). NBER.