

臺灣公路系統之脆弱度與回復力評估¹

VULNERABILITY AND RESILIENCE OF HIGHWAY NETWORKS IN TAIWAN

謝承憲 Cheng-Hsien Hsieh²

馮正民 Cheng-Min Feng³

(105 年 4 月 20 日收稿，105 年 7 月 25 日第 1 次修改，105 年 9 月 28 日定稿)

摘 要

由於全球環境變遷引起的極端氣候現象，近年來發生在臺灣地區之自然災害其強度與頻率日益增加，導致人員之傷亡與嚴重之財產損失。關鍵基礎設施受災後若無法發揮功能，除了影響日常生活與經濟活動之持續運作外，更可能因相互依賴性造成其他系統一併失效。關鍵基礎設施中，公路系統對於災害管理之重要性不言可喻，除了資源調度與預先疏散功能外，更直接影響災害應變與復原，尤其是救災物流與救援行動之進行。本研究以社會經濟與環境觀點評估臺灣公路系統之脆弱度與回復力，並將設施與脆弱因子間之相依性納入考量，以臺北都會區路網及日月潭與阿里山二山區公路系統為實際案例進行分析。分析結果顯示，因特定路段失效導致鄰近路段服務水準退化、連結性、及與急救責任醫院之距離係影響都會區路網回復力之關鍵因子；山區公路系統部分，阿里山地區在聯外道路之疏散負荷、流量容量比、及經濟暴露度指標表現較佳，但整體脆弱度卻因平均觀光收益之空氣汙染衝擊及形成孤島之潛在衝擊性遠高於日月潭地區，顯示阿里山地區較缺乏從災害中回復之資源。本研究所建構之分析方法有助於規劃人員瞭解路網系統回復力之評估工具，並協助決策者進行調適策略

-
1. 本文係科技部專題研究計畫 (MOST104-2410-H-263-010) 部分成果，特此致謝。
 2. 致理科技大學行銷與流通管理系副教授 (E-mail: chhsieh@mail.chihlee.edu.tw)。
 3. 國立交通大學運輸與物流管理學系教授 (聯絡地址: 100 臺北市忠孝西路 1 段 118 號 4 樓 交通大學運輸與物流管理學系; 電話: (02)23494966; E-mail: cmfeng@mail.nctu.edu.tw)。

優先順序之參考，以改善路網受危害影響條件下之服務能力。

關鍵詞：公路系統脆弱度；相互依賴性；回復力；調適策略

ABSTRACT

Owing to extreme climatic events caused by global environmental changes, the frequency and magnitude of natural hazards in Taiwan have increased in recent years, leading to deaths, injuries, and substantial damages to properties. Disruptions to critical infrastructures have impaired the ability to ensure sustainable daily operations and have caused further failures in other systems. Along with resource allocation and pre-evacuation, highway networks profoundly impact disaster response and recovery, particularly emergency disaster logistics and rescues. This study assesses the vulnerability and resilience of highway networks based on socioeconomic and environmental susceptibilities in Taiwan in regard to failures from the perspectives of interdependency. A metropolitan road network and the mountainous highways are employed as empirical cases. Analytical results demonstrate that the level of service on adjacent links, connectivity, and accessibility for emergency medical facilities significantly impact the resilience of metropolitan highway networks. Alishan performs better in highway loading, level of service, and economic exposure; however, the sustainability of Alishan is more vulnerable than that of Sun Moon Lake because of the more serious impact of emission and fewer disaster recovery resources. The proposed method can assist planners in understanding the assessment tools for highway network resilience and help decision makers prioritize their adaptation strategies to improve serviceability of the road network during hazardous conditions.

Key Words: *Highway network vulnerability; Interdependency; Resilience; Adaptation strategies*

一、前言

近年來因環境劇烈變遷，自然危害 (natural hazard) 愈趨威脅人民生命與健康安全、並造成社會經濟發展之阻礙，故危害致災嚴重損害生活之品質。具體而言，氣候與環境變遷之交互作用，更提升了災害 (disaster) 影響的強度 (magnitude)、延時 (duration) 及威脅程度。是以，災害研究逐漸從災害學的角度轉換為探討災害、環境、與社會經濟系統間之關係。2004 年，聯合國國際減災策略 (International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR) 將災害定義成危害對脆弱的社會經濟系統所造成的負面衝擊效果，其中，脆弱度 (vulnerability) 限制了系統對危害衝擊的因應能力 (coping capacity)。此外，兵庫宣言 (Hyogo Declaration) 建議應透過降低脆弱度以減緩災害所造成之痛楚，並進一步透過預警

系統、風險評估、教育及其他主動積極之整合方法，以建立國家及社區之回復力 (resilience) 達成減災目的^[1]。

運輸系統在日常生活中的通勤、通學、物流、及商務往來中扮演重要角色，運輸系統失效可能導致旅次重新規劃與分布、並衍生增加旅行時間與成本之大量損失。運輸系統有利於災害預防與整備時資源之部署及居民之預先疏散，並直接影響災後之救災物流、緊急醫療救援、及受災地區之可及性與復原能力。然而，運輸系統受損難以避免，如 2004 年南亞大海嘯、2005 年倫敦地鐵爆炸案、及 2011 年東日本大地震，都摧毀了運輸基礎設施，使得救援任務與資源配置更趨複雜，並增加二次災害產生之風險。可靠的運輸系統端賴其基礎設施與相關服務抵禦 (resist) 危害造成的負面影響、及如何於災後成功恢復營運之能力，是以運輸系統之脆弱度與回復力在近幾年成為防減災關注的焦點。但過去研究較著重於脆弱度之分析，少有針對運輸系統回復力進行探討之文獻。

據此，本研究奠基於過去針對臺灣考量相互依賴性 (interdependency) 之運輸系統脆弱度所建議之關鍵脆弱因子，並以不同之空間觀點與分析方法，研提都會區道路系統、及偏遠山區公路系統之脆弱度與回復力評估架構，以期在防減災與備災階段提供決策者參考。本文第二節將針對脆弱度與回復力進行定義；第三節探討具因果關係分析能力之模糊認知圖、感受性模型、及調整因子 (adjustment factor) 分析方法；第四節則以臺北市為都會區路網實例，與日月潭及阿里山為山區公路系統案例進行分析，並討論不同空間範疇公路系統之回復力與相關策略，最後提出結論與建議。

二、脆弱度與回復力

2.1 脆弱度

脆弱度係指面對危害時，主體會增加易損 (susceptibility) 程度的狀態，為一反向指標，脆弱度愈高表示個體或系統具備較差的抵抗能力^[2]，主要存在於抵禦或因應能力較差並處於不安全狀態下之系統；換言之，暴露於危害風險、衝擊或壓力下，且缺乏調適能力 (adaptability) 之系統，即為脆弱系統^[3]。政府間氣候變遷專業委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 定義脆弱度為氣候變遷對系統可能造成之損害或危害程度，不僅取決於系統敏感度 (sensitivity)，並與調適能力有關^[4]，國家層級之脆弱度分析應涵括基礎設施、土地使用管理與發展、及減災計畫 (disaster mitigation plan)^[5,6]。然而，影響脆弱度之因子會因不同之系統、危害型態、與時空背景而有所不同^[7]，但部分學者亦納入暴露度 (exposure) 之概念，將脆弱度視為暴露於有害事件影響之元素，如道路、建築、人員或經濟，有助於抵禦、因應自然災害並從中復原的能力^[8]；或為缺乏暴露於環境與社會變遷導致負面衝擊下之調適能力，所導致損失的敏感程度^[9]。

雖然脆弱度在運輸系統風險評估並不是嶄新的概念，但仍難定義出一個具有共識的運輸脆弱度。Jenelius 等人^[10]利用路段重要性與節點暴露度指標衡量路網脆弱度，主要係計

算單一路段失效時對於旅行延滯成本之影響；另根據區域重要性與暴露度之分析，路段失效若導致用路人須繞行較長距離之替代路徑、及較長之延滯時間，顯示其可及性較低、亦即較為脆弱^[11]。Bana e Costa 等人^[12]討論因地震而引起之橋樑及隧道之脆弱度，據以界定優先防護順序；另外，在需求不確定性條件下，以影響區域觀點評估路段中斷之衝擊；由於係以影響區域替代整體路網，在較大規模之壅塞系統中，得以展現其效率優勢^[13]。

Hsieh 等人^[14]以 11 項指標分析橋樑失效之脆弱度，並發現可及性及備援性影響脆弱度與風險至鉅，部分脆弱度較高之橋樑，其失效更涉及年長、低收入且缺乏自救能力之弱勢族群，難以在緊急救護需求下以獲得充足就醫保障。Cox 等人^[15]考量脆弱度、彈性 (flexibility) 及資源可得性觀點，探討恐怖攻擊後經濟活動旅次變化，研究結果顯示多數旅次的減少係因為用路人心理害怕因素而非實質路網容量降低。Miller-Hooks 等人^[16]提出一個協助規劃者在失效前評估路網脆弱度、及受災前減緩脆弱度投資決策的架構。Hsieh 與 Feng^[17]以系統相依性概念分析都會區路網脆弱度，該研究建議之脆弱度改善策略包括：降低最短替代路徑之延滯時間、減緩鄰近路段的服務水準、及改善地區至急救責任醫院之可及性。根據上述文獻，本研究定義路網脆弱度為，考量路網面對危害造成負面影響時之抵禦及因應能力，滿足用路人足夠旅次需求之運行能力。

2.2 回復力

回復力係指系統於外部威脅時之抵禦損害及復原能力^[18]，UNISDR^[1]定義回復力是及時且有效地抵禦、吸收、適應危害負面影響並從中復原之能力，例如修復或維持基本功能。除了脆弱主體的暴露度與危害所造成的損失外，敏感度與回復力亦應視為脆弱度的一部分^[19]，回復力有助於學者從社會觀點來了解自然災害^[20]，由於社會與自然系統間複雜且難以對應之衡量尺度、及其間之相依性，回復力展現人與環境動態交互作用之多重組態 (multiple configurations)^[21]，強調界定關鍵系統功能、並建置穩健 (robust) 且具彈性程序之能力^[22]。回復力評估係應用可得資源、社會準備性、及公共政策相關之系統功能性變異程度 (如災損與復原路徑) 的一種無維度分析函數^[23]，Zhuo 等人^[20]藉由分析臺灣社會生態系統 (social-ecological system) 面對頻繁且強烈颱風所造成變化時之抵禦能力以評估回復力，研究發現由林地變更為農地或都市使用的土地使用變遷，導致生態系統回復力之退化。

回復力係指對於會影響績效之外部應力之反應能力，以運輸觀點為例，可為吸收擾動並確保系統持續營運的能力^[24]。用路人風險感知 (risk perception) 會影響脆弱改善政策之實施及運輸系統之回復力^[15]，因為依危害而改變風險感知會導致行為反應變化，如運具選擇之改變^[25]。美國國土安全部 (Department of Homeland Security) 認為決策者應該要能夠根據風險情境下擬訂改善策略以降低脆弱度與不確定性，並發展機構能力以迅速適應新的危害^[26]。發展穩健且可靠的脆弱度量測方法、與促進管理機制的調適能力與回復力是密不可分的^[21]，Rose^[27]界定兩種系統回復力型態，靜態回復力表示系統維持自身功能之能力、而動態回復力則指系統從擾動中迅速恢復至穩態的能力。根據上述定義，本研究中

所指回復力為系統抵禦、吸收及適應危害導致之負面衝擊，並從擾動中迅速恢復至穩態的能力。

三、研究方法

3.1 相依性分析方法

由於影響運輸路網之脆弱度因子存在交互作用性，當危害損及一項系統構件時，其他構件亦可能因與受影響構件間存在因果關係而導致功能喪失，脆弱因子間的交互作用往往又可能產生影響迴圈 (feedback loop) 而非僅具單一方向性，如果未將迴圈產生的影響納入考慮，可能會低估系統之脆弱度 [17]，欲釐清及管理系統行為，系統構件間之交互作用即扮演舉足輕重的角色。要有效率地探討並控制系統行為所費不貲，是以學者導入系統動態 (system dynamic) 方法，藉由確認系統構件間之因果關係模擬複雜且具不確定性之系統行為 [28]，以克服傳統方法分析複合作用、不確定性、迴圈、及疊代 (iteration) 時之限制 [29]。

然而，社會系統運作的複雜程度可能導致無法獲得構件間精確的因果關係 [30]，學者們發展模糊認知圖 (fuzzy cognitive maps, FCMs)，利用模糊邏輯以解決因子與其關聯性難以量化的問題。式 (1) 中 M 為因果影響矩陣 (causal impact matrix)，其中因果關係 L_{ij} 係指系統構件 C_i 對系統構件 C_j 之影響強度， C_i 為因、 C_j 為果，其影響強度則以模糊區間 $[-1, 1]$ 表示，若 $L_{ij} > 0$ 表示 C_i 對 C_j 為正向影響、 $L_{ij} < 0$ 則表示遞減的 C_i 反而導致 C_j 呈成長趨勢。縱使二構件互為因果，其強度亦可能有所差異，是以 M 並非對稱矩陣。

$$M = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_j & \cdots & C_n \\ \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & \cdots \\ L_{21} & \ddots & & \\ \vdots & & L_{ij} & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \ddots \end{bmatrix}_{n \times n} & C_1 \\ & C_2 \\ & C_i \\ & \vdots \end{matrix} \quad (1)$$

式(2)中 A^t 係由系統構件 C_i 在疊代 t 時的狀況水準 a_i^t 所組成，假設系統共有 n 項構件，則 A^t 為一 $1 \times n$ 之向量 (vector)。疊代 $t+1$ 之運算如式(3)所示，其中門檻函數為單極 S 型函數 (unipolar sigmoid function) $f(x) = 1/(1 + e^{-5x})$ 。門檻函數將確保構件狀況水準落在區間 $[0, 1]$ 內，疊代產生之均衡向量有助於假設 (what-if) 問題之理解。

$$A^t = [a_1^t \quad a_2^t \quad \cdots \quad a_i^t \quad \cdots]_{1 \times n} \quad (2)$$

$$A^{t+1} = f(A^t \times M) \quad (3)$$

為釐清脆弱度因子之系統角色，本研究利用 Vester 與 von Hesler [31] 所建構的感受性

系統模型 (sensitivity model) 探討之，感受性系統模型亦利用影響矩陣表示每一成對因子間之關聯程度，其關聯程度係提供預擬數據為參考，預擬數據用以提醒權益關係人完全相關為 1、非常相關為 0.75、相關為 0.5、稍微相關為 0.25、完全無關為 0，並由權益關係人據以考量矩陣因子間直接影響程度後所填數據，由開放參與式會議討論形成共識。該矩陣透過脆弱度因子在系統中影響及被影響程度，加總行列運算產生不同的系統功能性變數，即為系統行為之表徵^[32]。系統功能性變數依其特性可區分為主動性、被動性、關鍵性、及緩衝性四類，相關分析結果有助於規劃者釐清關鍵脆弱度因子，並據以研提改善系統回復力之策略。

3.2 調整因子分析方法

除了以系統方法分析具相依性運輸系統脆弱度與回復力外，本研究亦採用交通工程常用之調整因子分析方法界定偏遠山區公路系統之脆弱度與回復力。由於臺灣山區公路系統常因地震與颱風等自然災害而受損，並可能導致孤島效應，增加救援難度；且目前臺灣山區強度較高、且對環境影響較為明顯之經濟活動屬觀光旅遊為最，是以本研究以山區觀光景點為分析對象，並考量山區公路系統脆弱度與永續觀光發展，界定基礎評量指標與脆弱度調整因子。

根據本研究定義之路網脆弱度，考量路網面對危害造成負面影響時之抵禦及因應能力，滿足用路人足夠旅次需求之運行能力，是以道路之承載能力是為山區公路系統脆弱度之基礎指標，較常用以評估路網承載能力之指標包括可及性 (accessibility) 與機動性 (mobility)。可及性常用以評估路網發展及潛在之區域經濟績效，用以考量經濟活動在空間上產生互動的潛在機會^[33]，亦即表示路網節點間是否得以容易地產生互動^[34]。機動性表示運具在路網中移動之效率，包括個體移動之容易程度^[35]。除基礎指標外，本研究以永續發展概念界定脆弱度調整因子，過去公部門可能為提升運輸效率而忽略環境品質，除在運輸設施建造過程產生固態廢棄物、水資源污染及生物棲息地之破壞外，運輸設施提供服務後因運具大量使用而產生空污、噪音及振動等外部性；近年氣候劇烈變遷下，溫室效應與全球暖化成為廣泛討論之議題，如何減緩空氣污染排放成為眾所關心之嚴峻挑戰。

除環境影響因素外，永續發展亦考量經濟效率與社會公平，由於實體暴露度之評估包括居民數、財產、系統等暴露於危害中之脆弱因子^[36]，是以平均所得常為經濟脆弱度之影響因子，地區平均所得愈高，受災時可能之災損將愈發嚴重。此外，為避免孤島效應導致山區道路更加脆弱，地區之維生自足能力亦為經濟脆弱面向之調整因子。社會面向部分，缺乏自保能力的弱勢族群比例往往與脆弱度成正向關聯，包括年長與身心障礙居民^[37]。高齡化現象與地區勞動生產力下降正在全球產生影響，依賴人口係指 15 歲以下、及 65 歲以上之人口數，與介於 15 歲至 65 歲間之勞動人口數之比例，較高的依賴人口表示每一工作人口之負擔較重、亦即較為脆弱。

據此，本研究以可及性與機動性為承載力基礎指標，環境汙染、平均所得、孤島衝擊、

及依賴人口為脆弱調整因子，如式 (4) 所示。調整因子計算以連乘方法進行，可避免脆弱因子單位不一致所產生之問題，且由於脆弱度為負向指標，是以部分指標需以其倒數衡量之。

$$\text{脆弱度} = \text{環境汙染} \times \text{平均所得} \times \text{孤島衝擊} \times \text{依賴人口} \times (\text{承載力})^{-1} \quad (4)$$

四、案例分析與討論

為界定影響都會區路網回復力之關鍵因子，奠基於 Hsieh 與 Feng^[17] 所建構考量相依性之都會區路網脆弱度評估模式，應用其驗證之 11 項脆弱度指標、及脆弱度指標間交互影響之因果關係，本研究藉由感受性系統模型定義各脆弱度指標於系統運作時扮演之角色，選取關鍵性脆弱度指標為回復力策略研擬依據，比較臺北市路網之脆弱度表現並討論其政策管理意涵。山區公路系統部分，本研究以臺灣二大著名觀光景點，阿里山與日月潭，為實際案例進行資料蒐集與分析，以比較阿里山與日月潭地區聯外道路系統之脆弱度與回復力，並研提相關改善策略。

所選取 11 項脆弱度指標係根據運輸脆弱度與防減災管理等領域之文獻回顧而得，其中主要依據 UNISDR^[1] 之分類，將脆弱度區分為實體、社會、與經濟層面考量。實體脆弱度部分主要包括個體、群體、及人造基礎設施面臨危害威脅之暴露度與因應能力，是以包括路網架構、旅行時間、交通量與居住人口等項目；社會脆弱度主要係以社會或人口結構評量當一地區受危害影響時所具備之抵抗或適應能力，若研究範圍內弱勢群體比例愈高，顯示其自保能力較差，是以納入依賴人口、身心障礙人口及與急救責任醫院之距離等因子；經濟脆弱度除考量面臨危害威脅時可能導致之損失外，亦可能影響災後復原之進行，是以亦被視為回復力之一環，除了所得與及業人口外，並將為因應災害所造成孤島效應衝擊之日常生活所需資源之備援性納入考量，但有於資料可得性，以批發零售業經營家數為其替代指標。

表 1 為 Hsieh 與 Feng^[17] 所建構之 11×11 影響矩陣，亦為式 (1) 中之 M ，每一脆弱度因子於系統中皆同時扮演主動因子及被動因子之角色，端賴脆弱度因子間之因果關係而定。矩陣中除對角線因不考慮自我影響均為 0 外，其數字即表示主動因子對於被動因子之影響強度。例如，第 1 行第 2 列的數值 0.9 即代表因特定路段失效導致鄰近路段服務水準退化，將正向且大幅影響替代道路之延滯時間；是例中鄰近路段服務水準退化及為主動因子、而替代道路延滯時間則為被動因子。表 1 由 11 位具備評估路網失效衝擊能力之專家學者，包括顧問公司規劃人員、中央與地方交通部門專家、災害管理研究人員及大學教授，透過腦力激盪、經驗學習等質化方法進行，以建立共識為最終目的。開放參與之過程強調不同參與個體間之溝通、合作與妥協，而其目的在於使參與者對系統之行為建立共識。

本研究進一步利用表 1 之資訊與數據，以進行都會區路網系統脆弱度因子之系統角色定位。其中，以絕對值加總第 i 列可獲得主動和 AS_i ，表示脆弱度因子 C_i 在系統中對其他

因子的主動影響程度；其次，以絕對值加總第 j 行可獲得被動和 PS_j ，表示脆弱度因子 C_j 在系統中被其他因子影響之程度。脆弱度因子系統定位則分別由主動和與被動和之乘積、及主動和與被動和之商數判斷之。主動和較高的脆弱因子，屬於對系統產生重大影響的因素，通常為前端策略介入因子，然若其乘積並非顯有優勢、且商數相對其他因子為高，可定位為系統之主動 (active) 因子，表示該因子缺乏被動影響產生之迴圈，並不適合成為回復力策略之候選方案。被動和較高之因子，將因系統變化而產生變動，屬於後端評估之績效因子，若欠缺對其他因子之主動影響能力，相對偏低之商數，則可定位為系統之被動 (reactive) 因子，被動性使該類型策略之投資難以有效改善系統脆弱度。而於系統中主動性與被動性同時相對為低之因子，其角色將坐落於系統之緩衝 (buffering) 區塊，對於系統行為之影響並無顯著作用。是以回復力改善策略應著重於乘積相對具有優勢的關鍵 (critical) 因子。

表 1 因果影響矩陣

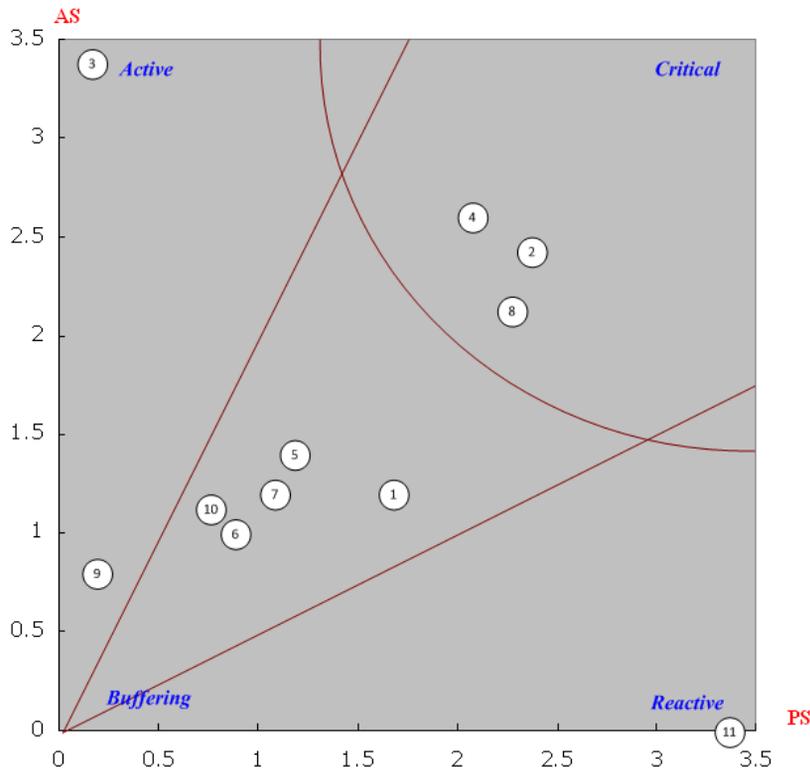
	被動因子 (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11)											
主動因子												
(1) 替代道路延遲時間	0	0.5	0	0	0	0	0	0.7	0	0	0	
(2) 鄰近路段服務水準退化	0.9	0	0	-1	0	0	0	0.5	0	0	0	
(3) 替代道路數量	-0.8	-1	0	0.9	0	0	0	-0.3	0	0	-0.4	
(4) 連結性	0	0	0	0	0.6	0	0	-0.8	0	0.6	-0.6	
(5) 居住人口數	0	0.3	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0.2	0.7	
(6) 依賴人口比例	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	
(7) 身心障礙人口比例	0	0	0	-0.2	0	0	0	0	0	0	0.7	
(8) 與急救責任醫院之距離	0	0	0	0	-0.3	-0.8	-1	0	0	0	0	
(9) 家戶所得	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.4	
(10) 及業人口數	0	0.6	0	0	0.3	0	0	0	0.2	0	0	
(11) 批發零售業家數	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

資料來源：Hsieh 與 Feng [17]

根據表 1 所計算之各脆弱度因子主動和與被動和為座標，繪製脆弱度因子系統定位圖如圖 1 所示。圖 1 以脆弱因子定位概念顯示第一項策略方針，其中因特定路段失效導致鄰近路段服務水準退化、連結性、及與急救責任醫院之距離成為影響都會區路網回復力之關鍵因子。因特定路段失效導致鄰近路段服務水準退化及連結性分別代表運輸系統之機動性與可及性，以用路人角度論之，可及性與機動性較延遲時間與替代道路數量更為直接相

關。與急救責任醫院之距離對於救援受災民眾，尤其是缺乏自救能力之弱勢群體，顯得相當關鍵，成為擔負都會區路網重要回復功能之角色。此 3 項脆弱因子之被動和亦名列前茅，顯示其具備都會區路網中影響系統變化的因果迴圈，是以政策發展應考量盡可能預防並改善其脆弱度。

連結性的改善部分，從影響矩陣中可以發現，影響連結性最明顯的因子為替代道路數量，尤其替代道路數量亦為主動和最高之因子，對系統的行為有不可忽視的影響，改善替代道路數量有助於減輕鄰近路段服務水準之退化，並形成改善脆弱度之正向迴圈，強化都會區路網回復力。此外，公部門亦應基於成本效益考量後，評估緊急醫療網之投資，以確保緊急醫療能量得以支持系統回復能力。



備註：數字代碼為表 1 中脆弱度因子之編號。

圖 1 脆弱度因子系統角色定位圖

回復力政策模擬部分，以極端強降雨為例，於臺北都會區投資備援替代道路之成本過高、且可能於平時造成閒置與浪費，是以本研究以未考慮實體工程建設之備援為前提，假設 2 種情境，情境 I 以改善非屬關鍵因子為政策投資，包括增加批發零售業家數、提升就業機會、及降低居民暴露度等 3 項策略方案；情境 II 則為強化路段排水能量以改善路段抵

禦洪災的衝擊、得減緩災時路網連結性之降低，並增加急救責任醫院密度，以確保脆弱族群在外力擾動下仍可獲得保護。基於上述情境與回復力策略，利用式(1)至式(3)進行疊代分析，都會區路網脆弱度模擬如圖 2 所示。

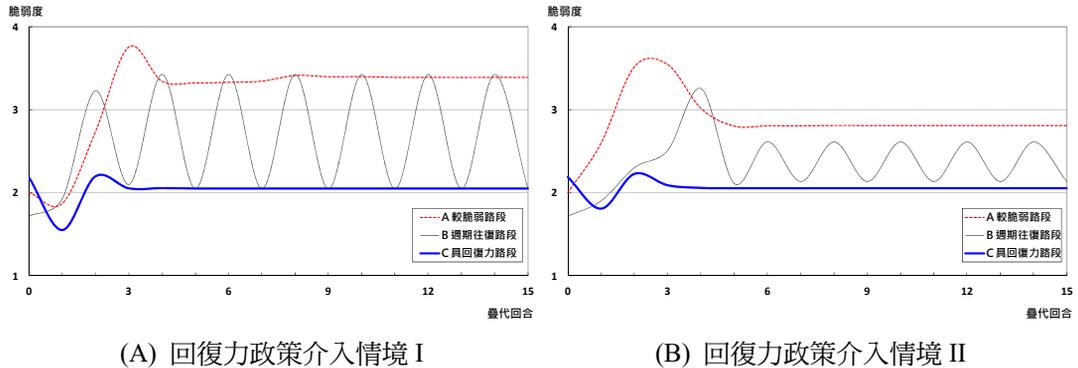


圖 2 脆弱度分析與回復力政策介入情境比較

圖 2(A) 為情境 I 回復力政策介入之系統模擬狀況，構成臺北市路網之 60 條路段可區分為 3 類脆弱度水準，A 類為較脆弱路段，脆弱度水準約為 3.4；B 類因旅次轉移與重新規劃路徑導致脆弱度呈 2.1 至 3.4 間之往復型態；C 類為抵禦性較高之路段，脆弱度水準約為 2.1。情境 I 之模擬結果與 Hsieh 與 Feng^[17]之分析結果並無明顯差異，主要係由於情境 I 所挑選之改善策略，並非感受性系統模型所界定之關鍵因子，是以相關投入所獲得產出與未投資改善策略之零方案並無明顯差異，顯示如未進行相依性分析可能導致資源錯置，且無法有效改善系統回復力。

相較於圖 2(A)，雖圖 2(B) 各路段之脆弱度仍分為 3 類、各路段所屬分類與情境 I 相同，且較具抵禦能力的 C 類路段其脆弱度水準亦與情境 I 相近，但較為脆弱的 A 類路段，其脆弱度因路網回復力政策而有所改善，自原先約 3.4 下降為約 2.8，而脆弱度往復之 B 類路段，最脆弱時期之水準亦由 3.4 降為 2.6，並往復於 2.1 至 2.6 間，顯示政策介入之都會區路網，得以維持較高之回復能力與功能性。模擬結果驗證了由感受性系統模型所界定之關鍵因子：連結度及與急救責任醫院之距離，其改善策略確實有助於提升都會區路網之回復力。

偏遠山區公路部分，本研究建構山區道路脆弱度基礎因子與調整因子如式 (5) 所示。其中 Vul 為分析地區之公路脆弱度； E 為觀光地區事業空氣汙染排放量； TR 為觀光地區事業總收益； I 為地區年度所得； R 為代表實體暴露度之地區居住人口數； A 為聯外道路數量； W 為代表日常必需品備援之批發與零售業經營家數； D 為依賴人口比； V 為聯外路段平均交通量；而 C 則為聯外路段容量。

$$Vul = \frac{E}{TR} \times \frac{I}{R} \times \frac{A}{W} \times \frac{D}{I} \times \frac{R}{A} \times \frac{V}{C} \quad (5)$$

基於式 (4) 架構，本研究承載力基礎因子部分考量機動性與可及性 2 項指標。以阿里山及日月潭之聯外道路其服務水準（流量與容量比， V/C ）為機動性之反向指標，與山區公路脆弱度方向一致；可及性部分則以聯外道路之負荷為考量，評估每一聯外道路需負責疏散暴露於危害中之居民數（ R/A ）為指標，其負荷愈高、脆弱度愈高。

脆弱調整因子部分，包括環境汙染、平均所得、孤島衝擊、及依賴人口。其中，環境汙染部分，由於無法取得移動污染源之排放數據，是以考量觀光地區之經濟活動特性，因臺灣仍以火力發電為主力，其排放對溫室效應與臭氧層破洞皆有負向影響，並威脅人類賴以維生的多樣性生態系統，故以營業表燈用電之碳排放量與觀光產業之收益比例（ E/TR ）估算之。平均所得採用分析地區居民平均年所得（ I/R ）為指標；為避免孤島效應，日常生活所需資源以批發及零售業經營家數為替代指標，當分析地區其批發與零售業經營家數愈多、暴露於危害的道路愈少，其脆弱度愈低，是以該項指標需以倒數（ A/W ）處理之。社會脆弱度部分，以依賴人口比例為指標，另考量可支配所得有助於提升地區自救與回復力，並降低依賴人口之脆弱程度，故以 D/I 表示之。式 (5) 中位於分子之指標，係屬運輸脆弱度指標，包括污染、暴露於危害之道路與潛在經濟損失、及依賴人口；而位於分母之指標則具備回復力或因應能力，得以減緩系統脆弱程度。

聯外道路選取部分，係指自分析地區連結至城際運輸系統之節點，包括高速公路及快速道路交流道、與高速鐵路及臺灣鐵路局場站；且因以地區性之中觀角度分析，本研究將阿里山與日月潭之聯外道路，分別簡化為 13 條與 7 條，數位化之空間位置如圖 3 所示，聯外道路選取準則係以定位為交通量較大且為公部門統計交通流量之主要動線。

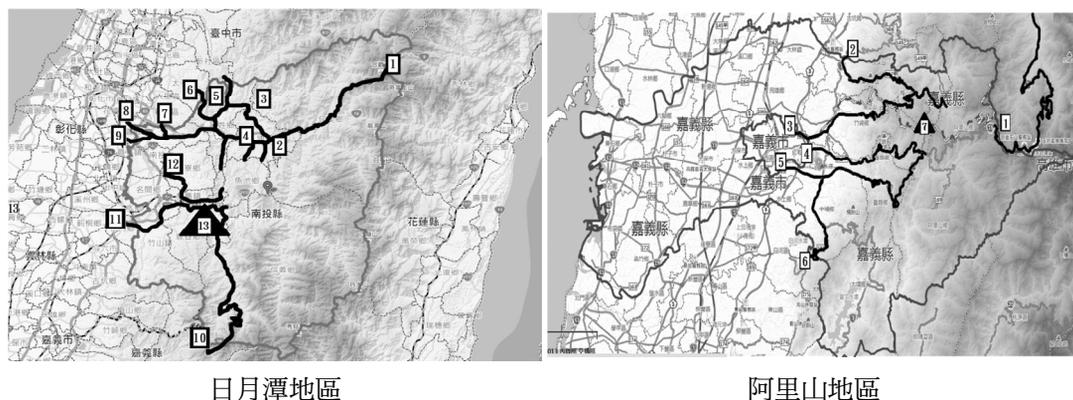


圖 3 山區聯外公路系統空間分布圖

山區公路脆弱度之相關分析數據係以 2013 年的公開統計資料、研究報告、及電子地

圖數位化資料而得。居住人口數與依賴人口比例取自行政區年度統計要覽、零售及批發業經營家數以經濟部商業司 101-102 年度服務業經營活動報告為基礎、家庭可支配所得則以財政部財稅資訊中心綜合所得稅申報資料統計專冊進行分析、營業表燈資訊來源為臺灣電力公司統計。是以根據營業表燈電量與發電碳排放比例計算之，日月潭地區之年營業用電所產生碳排放量約為 6,260 公噸、阿里山地區則約 1,900 公噸；日月潭地區經營批發零售業者有 371 家、阿里山地區為 104 家；地區年觀光收益部分，日月潭約新臺幣 15 億元、阿里山約新臺幣 2.6 億元；日月潭地區與阿里山地區之年度所得總額分別約為 15.6 億元及 3.7 億元；日月潭居住人口為 16,686 人、而阿里山為 5,732 人；依賴人口比例日月潭為 29.45%、而阿里山為 27.84%。將相關統計數據代入式 (5)，日月潭與阿里山地區公路系統之脆弱度如表 2 所示。

表 2 山區公路系統脆弱度分析結果

脆弱度評估指標	日月潭地區	阿里山地區
基礎評估指標		
聯外道路流量與容量比 (V/C)	0.88	0.52
道路負荷量 (R/A)	1.28	0.82
脆弱調整因子		
地區年均所得數 (I/R)	9.34	6.37
平均觀光收益之空汙污染衝擊量 (E/TR)	4.17	7.27
孤島衝擊性 (A/W)	0.04	0.07
平均所得依賴人口比例 (D/I)	1.89	7.62
整體脆弱性	2.91	10.12

表 2 分析結果顯示，雖然日月潭地區在聯外道路基礎承载力指標部分，皆較阿里山為脆弱，且地區暴露於危害影響下之年均所得亦較阿里山脆弱，但平均觀光收益之空汙衝擊及形成孤島之潛在衝擊性皆較阿里山為低，顯示阿里山地區較缺乏從災害中回復之資源，尤其在平均所得依賴人口比例部分，阿里山之脆弱程度為日月潭之 4 倍有餘。原始資料中阿里山之依賴人口比例略低於日月潭，顯示地區年均所得似乎成為影響山區公路系統之關鍵脆弱因子，然根據山區公路系統脆弱度分析之式 (5)，可以發現地區年均所得在脆弱調整因子之解構計算過程中可以被約分，其影響效果已不復存在；是以如何降低依賴人口比例成為改善山區公路脆弱度的方針之一，創造觀光就業機會有助於增加工作人口、進一步提升觀光收益，並直接降低依賴人口比例，然可能導致營業用電量增加及孤島衝擊性。若能輔導地區產業依天然條件小規模導入太陽能或風力等綠色能源，有利於減緩空氣污染之衝擊。

基於上述分析，山區開發雖然帶動當地經濟成長，同時也破壞了生態環境，山區公路

永續發展必須在自然環境、社會人文、人類三者間達到平衡，改善交通環境，提供方便且便捷之大眾運輸服務，不但可以增加旅客前來之意願，也可以降低發展對自然環境之破壞。利用電動公車進行接駁、並鼓勵營業商家改換節能效果較佳之用電設施，降低對環境之負面衝擊，永續發展亦有助於長程觀光事業經營，避免著眼於短期效益，維持觀光與生態環境資源，長遠論之將有助提升觀光收益。

此外，並應考量緊急救援能力之提昇以改善回復力，山區及偏遠地區於災害發生時，可能導致災區對外聯繫機能失效，而弱勢人口需依靠他人協助進行疏散作業，災後等待救援之期間，水、電以及民生用品之供應能力也備受考驗。建議調整防災資源、制定備援之存貨量，以增加回復力，如本研究考量批發零售業經營家數，影響當地緊急救援之能力，在批發零售業家數少之地區，其民生需求備援量應較其他同性質地區水準為高，增加災害發生時，內部自給自足之能力。另外，如果經脆弱度評估發現該區較為脆弱，救援機具暫放區位置可選擇鄰近脆弱地區，當災害發生時，可以馬上做出反應，進行救援之工作，以降低孤島之衝擊。

五、結論與建議

本研究除回顧運輸系統脆弱度分析方法與文獻外，並根據都會區路網與山區公路系統之特性，分別以相依性系統方法及脆弱調整因子分析法進行路網脆弱度與回復力之探討。考量防減災、災害整備與災後復原時影響系統回復力之關鍵因子，有助於決策支援，然同時亦增加了分析之複雜度；若路網回復力分析忽略因子間相依性，除可能低估路網脆弱度外，並可能導致改善策略資源之誤置。系統方法分析結果顯示，因特定路段失效導致鄰近路段服務水準退化、連結性、及與急救責任醫院之距離係影響都會區路網回復力之關鍵因子，本研究據以擬定維持路網連結性、增加急救責任醫院密度 2 項提升路網回復力之情境，模擬結果顯示確能有效降低都會區路網脆弱度。山區觀光景點部分，雖阿里山地區之聯外道路系統基礎承载力表現較佳，但因空氣汙染、孤島之衝擊性、及依賴人口所得比偏高，導致整體系統較日月潭為脆弱。

為了提升都會區路網之回復力並改善脆弱度，在防減災階段，公部門應形塑具備較高因應能力且氣候風險較低之環境，例如增加基礎設備援以強化路網在面臨災害時之連結性，或提升急救資源之密度以確保緊急醫療功能之運作。此外，提升對於政府機關、運輸業者、及環境敏感地區民眾之防災教育訓練，除提升風險感知水準外，亦有助於災害整備階段之資源配置、縮短疏散及應變所需時間、提升社區及居民之自保能量。另外，為了強化基礎建設抵禦危害的能力，應先辨識災害潛勢地區、界定區域內可能之脆弱因子，針對位於潛勢地區內具致災傾向之設施進行監測與預警，建立預先疏散及道路封閉等調適策略之標準作業流程，將提供決策者在防減災階段，依資源與路網服務水準之限制下設定情境，研擬在各情境下路網之回復力、及災害整備與復原階段之策略。

聯外系統較為脆弱的山區觀光景點，應著眼於減緩危害之負面衝擊，由於該地區需要經過更長的距離方得連結可及性較高之城際運輸系統，在緊急情況下，缺乏自保能力之民眾將無力以改變使用路徑或運具方式滿足既有旅次需求。為了滿足山區公路系統之可及性、機動性與永續性，管制私有運具之進入有助於降低疏散過程之路網負載量，同時並應以適當之整合式公共運輸系統、提供區內及對外充足之連結性。此外，山區觀光景點並應採用大眾運輸導向發展規劃 (transit-oriented development) 方式，包括行人友善環境、旅行及運輸資訊系統、及班次頻繁之公共運輸，以協助降低路網之壅塞與衝突點。進一步以環境觀點論之，政府可以補貼觀光地區採用電動公車等綠色能源運具，改善路網服務水準、環境退化、及環境敏感地區發展問題。發展產業應以環境友善之觀光產業為主，達到廢水與空汙之減排與廢棄物之減量；且增加該類產業有助於提升就業機會與及業人口，有助於吸引工作年齡人口回流並降低撫養人口比例

除了必要維生系統之維修，災害應變階段需建置臨時性設施，維繫受災地區之對外通訊與可及性以利災害救援行動。災害復原階段，規劃者應以避免日後類似危害仍可能重複致災之前提下方考量重建；除了強化工程規範外，建議提升具有調適性之設施回復力，如災時可持續運作環境、及災害保險之考量，而以整體國土規劃觀點評估失效設施應否重建則更顯關鍵。是以，未來研究可納入更明確之直接與間接運輸經濟評估，以更廣泛之內涵檢視運輸系統回復力分析，使災害風險管理架構更為完整。

參考文獻

1. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, “Hyogo Declaration”, <http://www.unisdr.org/2005/wcdr/intergover/official-doc/L-docs/Hyogo-declaration-english.pdf>, 2005.
2. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, “2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction”, http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf, 2009.
3. Chambers, R., “Vulnerability, Coping and Policy”, *IDS Bulletin*, Vol. 37, No.4, 2006, pp. 33-40.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Technical Summary – Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC, Geneva, 2001.
5. Cutter, S. L., Boruff, B. J., and Shirley, W. L., “Social Vulnerability to Environmental Hazards”, *Social Science Quarterly*, Vol. 84, No. 2, 2003, pp. 242-261.
6. Schmidt-Thomé, P., Greiving, S., Kallio, H., Fleischhauer, M., and Jarva, J., “Economic Risk Maps of Floods and Earthquakes for European Regions”, *Quaternary International*, Vol. 150, No. 1, 2006, pp. 103-112.
7. Yamane, A., “Climate Change and Hazardscape of Sri Lanka”, *Environment and Planning A*, Vol. 41, No. 10, 2009, pp. 2396-2416.

8. Dwyer, A., Zoppou, Z., Nielsen, O., Day, S., and Roberts, S., *Quantifying Social Vulnerability: A Methodology for Identifying Those at Risk to Natural Hazards*, Geoscience Australia, Canberra, 2004.
9. Adger, W. N., “Vulnerability”, *Global Environmental Change*, Vol. 16, No. 3, 2006. pp. 268-281.
10. Jenelius, E., Petersen, T., and Mattsson, L. G., “Importance and Exposure in Road Network Vulnerability Analysis”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 40, No. 7, 2006, pp. 537-560.
11. Jenelius, E., “Network Structure and Travel Patterns: Explaining the Geographical Disparities of Road Network Vulnerability”, *Journal of Transport Geography*, Vol. 17, No. 3, 2009, pp. 234-244.
12. Bana e Costa, C. A., Oliveira, C. S., and Vieira, V., “Prioritization of Bridges and Tunnels in Earthquake Risk Mitigation Using Multicriteria Decision Analysis: Application to Lisbon”, *Omega*, Vol. 36, No. 3, 2008, pp. 442-450.
13. Chen, B. Y., Lam, W. H. K., Sumalee, A., Li, Q., and Li, Z. C., “Vulnerability Analysis for Large-Scale and Congested Road Networks with Demand Uncertainty”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 3, 2012, pp. 501-516.
14. Hsieh, C. H., Su, J. L., and Feng, C. M., “Disaster Risk Assessment of Highway Bridge from Vulnerability Perspective”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 9, 2011, pp. 1-15.
15. Cox, A., Prager, F., and Rose, A., “Transportation Security and the Role of Resilience: A Foundation for Operational Metrics”, *Transport Policy*, Vol. 18, No. 2, 2011, pp. 307-317.
16. Miller-Hooks, E., Zhang, X., and Faturechi, R., “Measuring and Maximizing Resilience of Freight Transportation Networks”, *Computers and Operations Research*, Vol. 39, No. 7, 2012, pp. 1633-1643.
17. Hsieh, C. H. and Feng, C. M., “Road Network Vulnerability Assessment Based on Fragile Factor Interdependencies in Spatial-Functional Perspectives”, *Environment and Planning A*, Vol. 46, No. 3, 2014, pp. 700-714.
18. Clark, W. C., Jäeger, J., Corell, R., Kasperson, R., McCarthy, J. J., Cash, D., et al., “Assessing Vulnerability to Global Environmental Risks”, Workshop on Vulnerability to Global Environmental Change: Challenges for Research, Assessment and Decision Making, Warrenton, VA: Airlie House, May 22-25, 2000.
19. O’Brien, K. L., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., et al. “Mapping Vulnerability to Multiple Stressors: Climate Change and Globalization in India”, *Global Environmental Change*, Vol. 14, No. 4, 2004, pp. 303-313.
20. Zhuo, H., Wang, J., Wan, J., and Jia, H., “Resilience to Natural Hazards: A Geographic Perspective”, *Natural Hazards*, Vol. 53, No. 1, 2010, pp. 21-41.
21. Turner II, B. L., “Vulnerability and Resilience: Coalescing or Paralleling Approaches for Sustainability Science?”, *Global Environmental Change*, Vol. 20, No. 4, 2010, pp. 570-576.
22. Dekker, S., Hollnagel, E., Woo, D., and Cook, R., *Resilience Engineering: New Directions for Measuring and Maintaining Safety in Complex Systems*, Final Report, Lund University, Sweden, 2008.

23. Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M., “Framework for Analytical Quantification of Disaster Resilience”, *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 11, 2010, pp. 3639-3649.
24. Tamvakis, P. and Xenidis, Y., “Resilience in Transportation Systems”, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol. 48, 2012, pp. 3441-3450.
25. Prager, F., Beeler Asay, G. R., Lee, B., and von Winterfeldt, D., “Exploring Reductions in London Underground Passenger Journeys Following the July 2005 Bombings”, *Risk Analysis*, Vol. 31, No. 5, 2011, pp. 773-786.
26. Department of Homeland Security “National Infrastructure Protection Plan”, https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/nipp_consolidated_snapshot.pdf, 2009.
27. Rose, A., “Economic Resilience to Natural and Man-made Disasters: Multi-disciplinary Origins and Contextual Dimensions”, *Environmental Hazards*, Vol. 7, No. 4, 2007, pp. 383-395.
28. Alberts, H. C., Alberts, R. M., Bloom, M. F., LaFlamme, A. D., and Teerikangas, S., “The Three Gorges Dam Project from a Systems Viewpoint”, *System Research and Behavioral Science*, Vol. 21, No. 6, 2004, pp. 585-602.
29. Nguyen, L. D. and Ogunlana, S. O., “Modeling the Dynamics of an Infrastructure Project”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 20, No. 4, 2005, pp. 265-279.
30. Stylios, C. D. and Groumpos, P. P., “Fuzzy Cognitive Maps in Modeling Supervisory Control Systems”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Vol. 8, No. 1, 2000, pp. 83-98.
31. Vester, F. and von Hesler, A., *Sensitivity Model*, Umlandverband Frankfurt am Main, Frankfurt, 1982.
32. Chan, S. L. and Huang, S. L., “A Systems Approach for the Development of a Sustainable Community – The Application of the Sensitivity Model (SM)”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 72, No. 3, 2004, pp. 133-147.
33. Martellato, D., Reggiani, A., and Nijkamp, P., “Measurement and Measures of Network Accessibility - Economic Perspectives”, In K. Button, P. Nijkamp, and H. Priemus (Eds.), *Transport Networks in Europe; Concepts, Analysis and Policies*, Edward Elgar, London, 1998, pp. 161-180.
34. Levine, J. and Garb, Y., “Congestion Pricing Conditional Promise: Promotion of Accessibility or Mobility?”, *Transport Policy*, Vol. 9, No. 3, 2002, pp. 178-188.
35. Levinson, D., “Perspectives on Efficiency in Transportation”, *International Journal of Transport Management*, Vol. 1, No. 3, 2003, pp. 145-155.
36. Cardona, O. D. and Carreño, M. L., “Updating the Indicators of Disaster Risk and Risk Management for the Americas”, *Journal of Integrated Disaster Risk Management*, Vol. 1, No. 1, 2011, pp. 1-21.
37. Messner, F. and Meyer, V., “Flood Damage, Vulnerability and Risk Perception – Challenges for Flood Damage Research”, In J. Schanze, E. Zeman, and J. Marsalek (Eds.), *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, Springer, Netherlands, 2006, pp. 149-167.