การพัฒนาเดฟิซิตฟังก์ชันสำหรับระบบขนส่งสาธารณะแบบโมดูล
Deficit Function Development for Autonomous Modular Public Transit

เทวิษฎ์ ขันติอยู่ และ ทรงยศ กิจธรรมเกษร*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่
**Corresponding author; E-mail address:songyot.k@cmu.ac.th*

บทคัดย่อ

การพัฒนาของเทคโนโลยีระบบขนส่งสาธารณะยกระดับคุณภาพชีวิต เทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับผนวกกับการสื่อสารที่รวดเร็วถูกนำมาพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะไร้คนขับแบบโมดูล (Autonomous Modular Public Transit; AMPT) ที่มีความยืดหยุ่นในการให้บริการ ทั้งทางด้านการดำเนินงาน (Operation) และความจุ ทำให้มีความซับซ้อนในการหาจำนวนยานพาหนะขั้นต่ำที่ต้องใช้ในการให้บริการ (Minimum Fleet Size, MFS) ของระบบ AMPT ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเดฟิซิตฟังก์ชัน (Deficit Function) ที่อยู่ในรูปแบบกราฟฟิก มีพื้นฐานจากปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Problem) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาจำนวนโมดูลในการให้บริการขนส่งสาธารณะ แต่เดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดทำให้ไม่สามารถนำไปใช้กับ AMPT ได้ ในงานศึกษานี้จึงเสนอเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนา (Developed Deficit Function) ซึ่งต่อยอดมาจากเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยาย(Extended Deficit function) ให้สามาถใช้กับ AMPT ที่มีลักษณะการให้บริการที่สามารถสับเปลี่ยนโมดูลระหว่างการให้บริการได้ ซึ่งจะเพิ่ม/ลดความจุให้สอดคล้องกับความต้องการการเดินทางในแต่ละช่วงเวลา จากกรณีศึกษาโครงข่ายระบบขนส่งสาธารณะภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่าเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาสามารถนำไปใช้กับ AMPT และยังสามารถลดจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการให้บริการของระบบขนส่งมวลชนในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่เป็นรูปแบบของ AMPT ในกรณีที่สามารถสับเปลี่ยนโมดูลระหว่างการให้บริการได้

คำสำคัญ: จุดเปลี่ยนถ่ายโมดูล, เดฟิซิตฟังก์ชัน, ระบบขนส่งสาธารณะไร้คนขับแบบโมดูล

Abstract

The development of public transport technology improves the quality of life. Driverless vehicle technology combined with real-time communication has been used to develop autonomous modular public transit (AMPT). A modular bus is a preferred system that offers flexibility in both operational and capacity as well as a higher level of service that is complicated to determine minimum fleet sizes of AMPT service. In this study, we selected the deficit function to determine the minimum fleet size of the AMPT system by developing the Extended Deficit Function to be proper with the AMPT system in case of switchable modules during operation. The results show the developed deficit function can be used with the AMPT system and also reduced the Minimum fleet size of the AMPT system in case of switchable modules during operation.

Keywords: Autonomous modular public transit (AMPT), Deficit function, Minimum fleet size (MFS), Modular bus

1. คำนำ

การพัฒนาของระบบขนส่งที่ยั่งยืนเกิดจากมีการแข่งขันในด้านการใช้พลังงาน ด้านการลดมลภาวะและลดความแออัดของการจราจร ซึ่งหนึ่งส่วนสำคัญในการพัฒนาอย่างยั่งยืนของการขนส่งก็คือระบบขนส่งสาธารณะ ระบบขนส่งสาธารณะส่วนใหญ่ให้บริการในรูปแบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทาง(Fixed-route) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงตารางเวลา [1] ระบบขนส่งรูปแบบดังกล่าวนั้นมีข้อจำกัดด้านการให้บริการแบบ real-time และการให้บริการในช่วงเวลาที่มีความต้องการของผู้ใช้บริการมาก ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในด้านของเทคโนโลยียานยนต์ ซึ่งยานยนต์ไร้คนขับเป็นหนึ่งในก้าวสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่อย่างจำกัดหรือในด้านของเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีทั้งขนาดและความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลและประมวลผล เทคโนโลยีข้างต้นถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาด้านระบบขนส่งสาธารณะข้างต้น ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่ถูกนำเสนอและได้รับความสนใจก็คือโมดูลล่าบัสแบบไร้คนขับ (Autonomous modular bus: AMB) หรือ ระบบขนส่งสาธารณะไร้คนขับแบบโมดูล (Autonomous Modular Public Transit: AMPT) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านความยืดหยุ่นในการจัดการและให้บริการระบบและสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านบุคลากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 1 ตัวอย่างโมดูลที่ใช้ในระบบ AMPT (ที่มา:https://www.next-future-mobility.com/home)

ฟังก์ชันหลักของระบบขนส่งสาธารณะแบบ AMB หรือ AMPT มีแนวคิดหลักคือ โมดูลที่สามารถเชื่อมต่อกันเองได้เมื่อมีการใช้เส้นทางร่วมกันและแยกออกจากกันเมื่อเส้นทางร่วมแยกออกจากกัน สามารถปรับความจุให้สอดคล้องกับความต้องการในการใช้บริการของผู้โดยสารในแต่ละช่วงเวลาของวัน (เป็นการปรับความจุที่สถานีหลักก่อนที่จะให้บริการ) สามารถให้บริการตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปยังจุดหมายปลายทาง (Door-to-Door service) โดยความจุของโมดูลขึ้นอยู่กับโมดูลรูปแบบของระบบ AMPT ที่นำมาใช้ [2] โดยหนึ่งในตัวอย่างที่มีการนำแนวคิด AMPT มาใช้ก็คือระบบ Dynamic Autonomous Road Transit หรือ DART ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท TUMCREATE ในประเทศสิงคโปร์ โดยมีความจุอยู่ที่ 30 คนต่อ 1 โมดูลและสามารถเชื่อมต่อกันได้สูงสุด 10 โมดูล โดยมีสิทธิ์ของทาง (Right of Way) ที่แตกต่างไปจากรถบัสที่เป็นการวิ่งรวมไปกับการจราจร(Mixed with Traffic) หรือรถไฟฟ้ารางเบา (Light rail transit) หรือรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน(Mass rail transit) ที่ถูกควบคุมให้แยกออกจากการเดินทางรูปแบบอื่น (Fully separated with others traffics) ในขณะที่ DART นั้นเป็นกึ่งกลางระหว่าง 2 รูปแบบ (Partially separated) ที่กล่าวไปข้างต้น [3] ด้วยความสามารถในการปรับเปลี่ยนความจุหรือการสับเปลี่ยนโมดูลของระบบ AMPT ทำให้ปัญหาในด้านของวางแผนมีความซับซ้อนในด้านการคำนวนหาจำนวนโมดูลขั้นต่ำที่ใช้ในการให้บริการ (Minimum Fleet Size: MFS) โดยมีพื้นฐานจากปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Problems) ซึ่งจำนวนโมดูลขั้นต่ำที่ต้องใช้ในการให้บริการนั้นเป็นส่วนสำคัญในด้านของค่าใช้จ่ายในการให้บริการ กรณีการศึกษาของ Tao Liu et. al, (2020) ที่แก้ปัญหา MFS โดยเสนอการพัฒนาเดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิม (Traditional Deficit Function) ให้เหมาะสมกับระบบ AMPT เนื่องจากเดฟิซิตฟังก์ชันมีข้อดีที่กราฟฟิกมีรูปแบบที่เข้าใจง่าย โดยศึกษาในกรณีที่ตัวโมดูลนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางระหว่างการให้บริการ ซึ่งพบว่าเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยาย (Extended Deficit Function) สามารถนำไปใช้แก้ปัญหา MFS ของระบบ AMPT ได้

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการพัฒนาต่อยอดของเดฟิซิตฟังก์ชันของ Tao Liu et. al. (2020) ให้สามารถแสดงถึงกิจกรรมที่เกิดขึ้นของโมดูลภายในระบบขนส่งที่สนใจได้ละเอียดยิ่งขึ้นและสามารถนำไปใช้กับ AMPT ที่โมดูลมีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางระหว่างสถานีย่อยในระบบ และการรองรับการสับเปลี่ยนโมดูลระหว่างการให้บริการ โดยแสดงในรูปแบบของกราฟฟิกที่เข้าใจง่าย

2. เดฟิซิตฟังก์ชัน(Deficit Function)

2.1 เดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิม (Traditional Deficit Function)

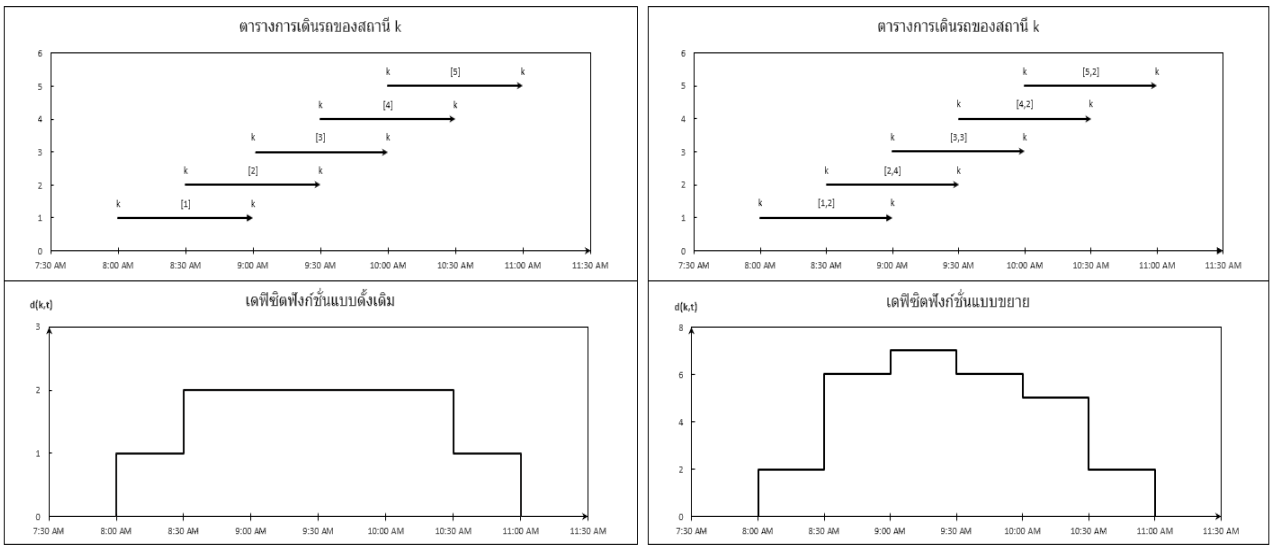
เดฟิซิตฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการวัดหรือแสดงปริมาณรถที่ต้องใช้ในแต่ละช่วงเวลาของสถานีต้นทางหรือปลายทางที่สนใจในระบบขนส่ง [4] โดยเดฟิซิตฟังก์ชันจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1 ในแต่ละเที่ยวการเดินทางที่ออกจากสถานีและลดลงเท่ากับ 1 เมื่อมีเที่ยวการเดินทางเข้ามาสู่สถานีที่สนใจ โดยที่ผลที่แสดงออกมาคือปริมาณยานพาหนะที่ต้องใช้ในการขนส่งผู้โดยสารในแต่ละช่วงเวลาของสถานีที่สนใจ ไม่นับรวมกับสถานีอื่นๆ ภายในระบบ โดยข้อมูลที่ต้องใช้ในการสร้างเดฟิซิตฟังก์ชันคือตารางการเดินทางของสถานีที่สนใจ โดยถูกแสดงออกมาให้อยู่ในรูปกราฟฟิกที่เข้าใจง่าย

ให้ d(k, t, S) คือจำนวนยานพาหนะที่ต้องใช้ สำหรับสถานี k ที่เวลา t สำหรับตารางการเดินทาง S โดยค่าของ d(k, t, S) ถูกแสดงออกมาในรูปแบบของจำนวนการเดินทางออกจากสถานี k หักลบกับจำนวนการเดินทางที่มาถึงสถานี k ณ เวลา t โดยค่าที่มากที่สุดของ d(k, t, S) ในช่วงเวลาของ [T_1, T_2] คือ D(k, S) หรือจำนวนยานพาหนะที่ต้องการใช้ในการให้บริการของสถานี k

โดยตัวอย่างการใช้เดฟิซิตฟังก์ชันถูกแสดงออกมาอยู่ในรูปที่ 1 เป็นตารางการเดินรถของสถานี k ที่ช่วงเวลา [T_1, T_2] =[8:00, 11:00] โดยเป็นตารางการเดินทางที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโดยสถานีเริ่มต้นและสถานีปลายทางเป็นสถานีเดียวกัน มีเที่ยวการเดินทางทั้งหมด 5 เที่ยว มีการเดินทางออกจากสถานี k ทุกๆ 30 นาทีและในหนึ่งรอบการเดินทางใช้ระยะเวลาเท่ากับ 1 ชั่วโมง โดยตัวเลขที่อยู่บนลูกศรในตารางการเดินรถของสถานี k บ่งบอกถึงหมายเลขของการเดินทาง ตัวอย่างเช่นการเดินทางที่ [1] เริ่มที่เวลา 8:00 น. จะเห็นในกราฟเดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิมมีการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1 ที่เวลา 8:00 น. ที่เวลา 8:30 น. กราฟเดฟิซิตฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 2 เนื่องจากมีการเพิ่มของเที่ยวการเดินทางที่ [2] เข้ามาแต่ที่เวลา 9:00 น. เดฟิซิตฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 2 เท่าเดิมเนื่องจากมีการสิ้นสุดของเที่ยวการเดินทางที่ [1] และมีเที่ยวของการเดินทางที่ [3] เพิ่มเข้ามาทำให้เกิดการหักล้างกัน และเมื่อทำไปจนครบทุกเที่ยวของการเดินทางในช่วงเวลา [8:00,11:00] จำนวนรถมากที่สุดที่ต้องใช้ในการให้บริการมีค่าเท่ากับ 2 หรือสามารถแสดงในรูปสัญลักษณ์ D(k,t) = 2

2.2 ที่มาและการใช้งานเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยาย (Extended Deficit Function)

วิธีการที่ทำให้ได้ MFS สามารถจำแนกได้ 4 วิธี [5] วิธีการแรกเป็นของ Dantzig และ Fulkerson (1954) ได้ทำการคิดค้นวิธีการจัดการให้มีการใช้รถขนส่งน้ำมันให้น้อยที่สุดโดยตารางเวลาไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งออกมาในรูปแบบของกำหนดการเชิงเส้น(Linear Programming) ที่อยู่ในส่วนของปัญหาด้านระบบขนส่งโดยการใช้แค่เลข 0 กับ 1 ในการแสดงถึงในส่วนที่ยอมรับไม่ได้และยอมรับได้ ตามลำดับ วิธีที่สองคือวิธีการใช้ Deficit Function ในการหา MFS ของระบบ วิธีที่สามคือวิธี Continuum Approximation(CA) และวิธีสุดท้ายคือใช้ Mathematical programing



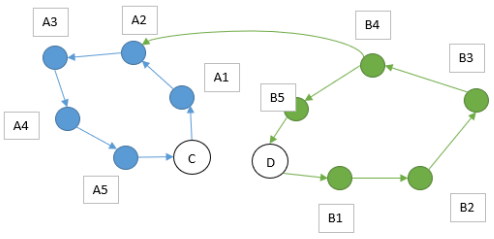
รูปที่ 2 ตารางการเดินรถและเดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิม(ซ้าย)และเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยาย(ขวา)

ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพิจารณาจากพื้นฐานของการเดินทางหนึ่งครั้งใช้ยานพาหนะหนึ่งคันเท่านั้น ทำให้วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นไม่สามารถใช้ได้กับ AMPT เนื่องจากในการเดินทางในแต่ละรอบ ปริมาณยานพาหนะ (โมดูล) มีการเปลี่ยนแปลงให้สอดคล้องกับจำนวนของยานพาหนะตามความต้องการของผู้ใช้ในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละวัน ทางผู้วิจัยจึงได้คิดค้นวิธีที่สามารถมาทดแทนวิธีแบบดั้งเดิมและเหมาะสมสำหรับ AMPT ก็คือ เดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยายด้วยที่มีพื้นฐานมาจากเดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิมที่มีข้อดีด้านกราฟฟิกที่เข้าใจง่าย

โดยความแตกต่างของเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยายจากแบบดั้งเดิมคือเดฟิซิตฟังก์ชนแบบขยายคือการเพิ่มหรือลดลงของฟังก์ชันในแต่ละครั้งสามารถมีได้มากกว่าหรือเท่ากับ 1 โดยมีตัวอย่างอยู่ในรูปที่ 2 ด้านขวา โดยสนใจที่สถานี k ในช่วงเวลา [8:00,11:00] โดยตัวเลขที่อยู่บนลูกศรของตารางการเดินรถ k จะมีความแตกต่างรูปที่ 1 โดยจะมีตัวเลข 2 ตัวที่บ่งบอกถึงหมายเลขของการเดินทางและจำนวนโมดูลที่ใช้ของการเดินทาง ตามลำดับ ในเวลา 8.00 น. กราฟเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยายจะมีเท่ากับ 2 เนื่องจากมีเที่ยวการเดินทางที่ (1) ที่มีการเดินทางออกจากสถานี k โดยที่มีปริมาณโมดูลที่ใช้เท่ากับ 2 โมดูล ในเวลา 8:30 น. กราฟเดฟิซิฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 6 เนื่องจากเที่ยวการเดินทางที่ (2) มีจำนวนโมดูลที่ออกจากสถานี k เพิ่มอีก 4 โมดูลและในเวลา 9:00 น. มีเที่ยวการเดินทางที่ (3) ที่มีจำนวนโมดูลเพิ่มอีก 3 โมดูลแต่มีการสิ้นสุดของเที่ยวการเดินทางที่ (1) ที่มีจำนวนโมดูลกลับเข้าสู่สถานี 2 โมดูลเมื่อหักล้างกันทำให้ต้องเพิ่มจำนวนโมดูลเข้าระบบอีก 1 โมดูลทำให้กราฟเดฟิซิตฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 7 โมดูลและเมื่อทำไปจนครบทุกเที่ยวการเดินทาง โดยมีจำโมดูลสูงสุดที่ต้องใช้ในการให้บริการหรือ D(k) = 7 โมดูล

3. ความแตกต่างของเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาจากเดฟิซิตฟังชันก์แบบดั้งเดิมและแบบขยาย (Differences of Developed Deficit Function from Traditional and Extended Deficit Function)

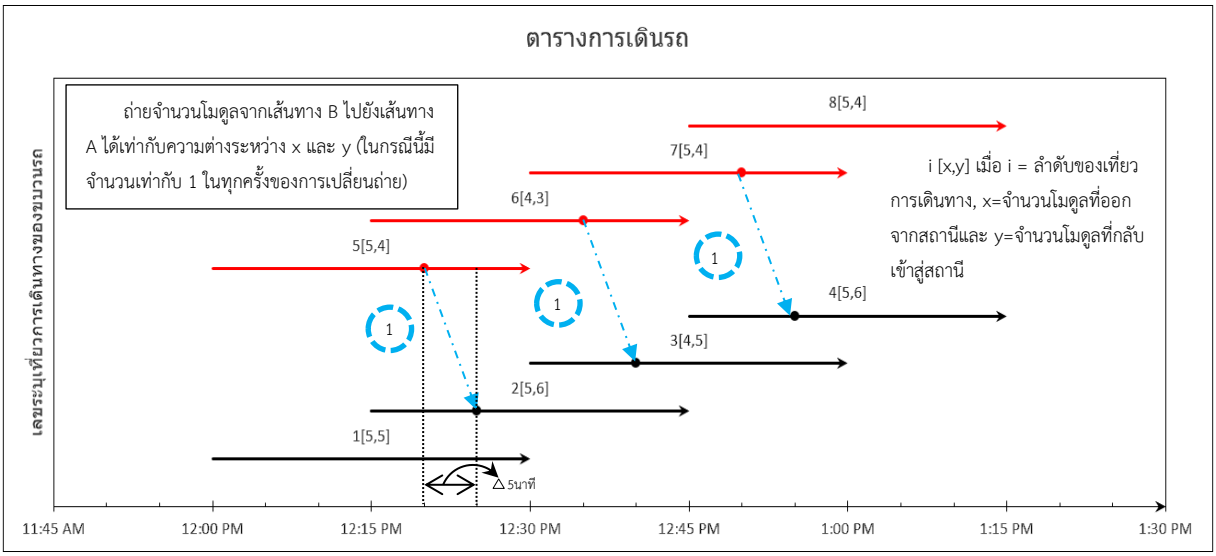
การวิเคราะห์เดฟิซิตฟังก์ชันในที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.1 และหัวข้อที่ 2.2 การพิจารณาการเพิ่มหรือลดจำนวนของโมดูลในระบบมีข้อจำกัดที่ต้องปรับเปลี่ยน ณ สถานีที่เป็นสถานีต้นทาง-ปลายทางเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอการพัฒนาเดฟิซิตฟังก์ชันที่สามารถรองรับ AMPT ที่มีการสับเปลี่ยนโมดูลระหว่างการให้บริการ เนื่องจากตารางการเดินรถสำหรับเดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิมและแบบขยายถูกสร้างบนพื้นฐานของข้อมูลการเดินทางของผู้โดยสารแต่ละช่วงเวลาจึงมีจำนวนโมดูลในขาออกและขาเข้า ณ สถานีหลักมีจำนวนที่เท่ากัน แต่ในการทำตารางการเดินรถของเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาอยู่บนพื้นฐานของจำนวนการขึ้น-ลงของผู้โดยสารในแต่ละสถานีย่อยเพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมในการเปลี่ยนถ่ายโมดูล ทำให้จำนวนโมดูลในขาเข้าและขาออกมีจำนวนไม่เท่ากัน โดยมีตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้อยู่ในรูปที่ 3 และมีตารางการเดินทางถูกแสดงออกมาอยู่ในรูปที่ 4



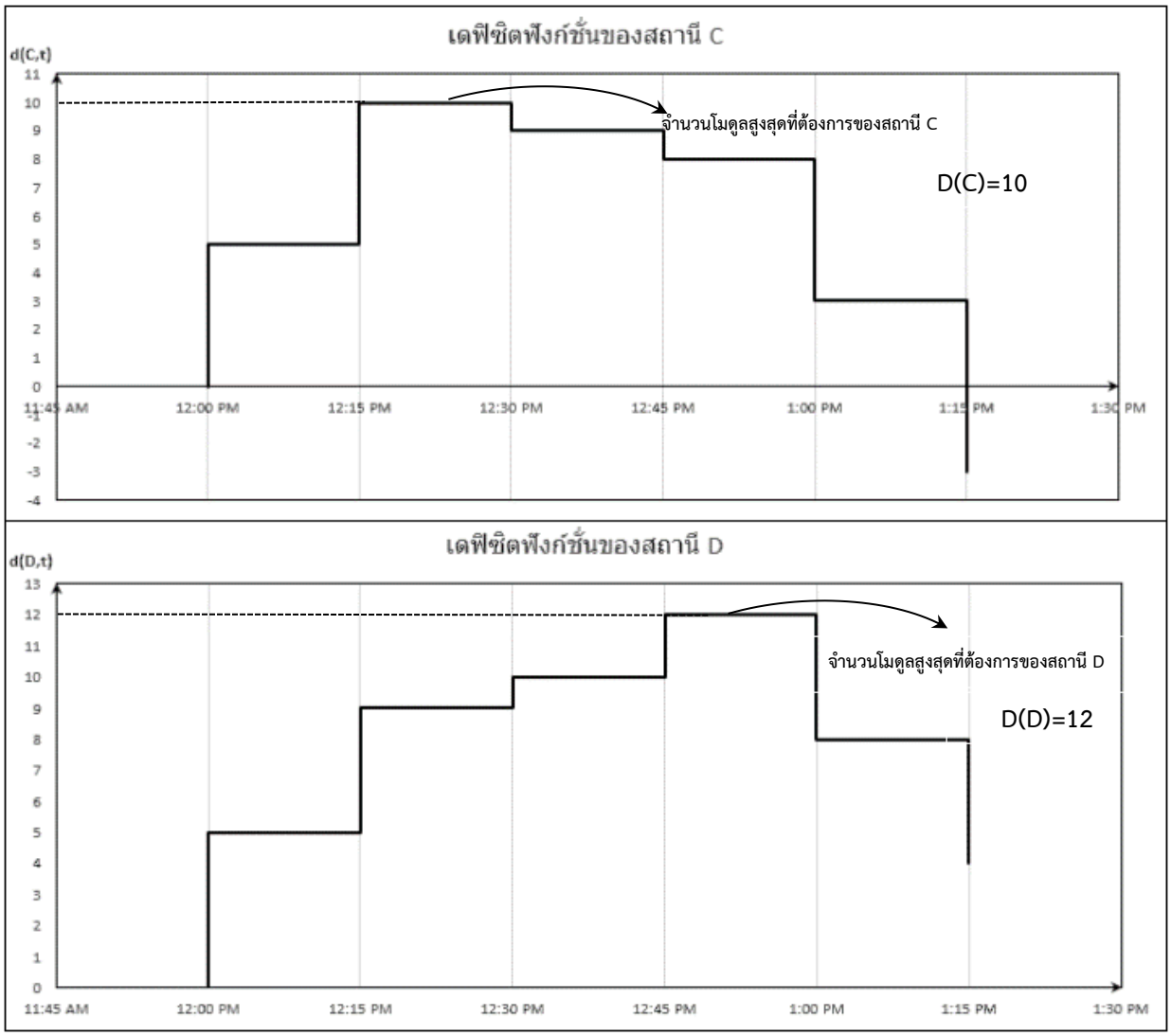
รูปที่ 3 ตัวอย่างโครงข่ายของระบบขนส่งที่เป็น AMPT

โดยมีสมมติฐานในการทำเดฟิซิตฟังก์ชันดังนี้

- ระยะเวลาที่ขบวนรถวิ่งระหว่างสถานีมีความเร็วและระยะเวลาในการเดินทางครบรอบ(Travel time) คงที่



รูปที่ 4 ตารางการเดินรถของสถานี C และ D ที่ช่วงเวลา [12:00,13:15]



รูปที่ 5 เดฟิชิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาของสถานี C(บน) และสถานี D(ล่าง) เมื่อเกิดการเปลี่ยนถ่ายโมดูลขึ้นภายในระบบโครงข่าย

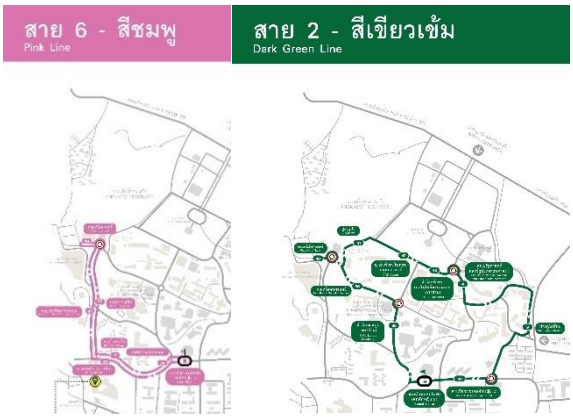
- เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนถ่ายโมดูลต่ำ
- ผู้โดยสารทำการเปลี่ยนเส้นทางการเดินทางได้จากสถานีหลักเท่านั้น (สถานี C และ D)
- ความจุของโมดูลถูกปรับให้สอดคล้องกับจำนวนผู้โดยสารเพื่อแสดงถึงลักษณะของเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนา

จากรูปที่ 3 ทิศทางการเดินรถของทั้งสองเส้นทางมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ทั้งสองเส้นทางมีระยะห่างระหว่างเที่ยว (Headway) เท่ากับ 15 นาทีและมีจุดที่สามารถเปลี่ยนสำเปลี่ยนโมดูลที่เกิดขึ้นที่จุด B4 และเปลี่ยนถ่ายไปยัง A2 โดยใช้เวลาในการเปลี่ยนถ่าย 5 นาทีเช่นเดียวกับระยะห่างระหว่างสถานีย่อยภายในเส้นทาง ตัวอย่างเช่นการเดินทางจากสถานี D ไปยัง B4 ใช้เวลา 20 นาทีเป็นต้น

ในตารางการเดียวทางจากรูปที่ 4 มีเที่ยวการเดินทางทั้งหมด 8 เที่ยวการเดินทาง เที่ยวที่ 1 ถึง 4 เป็นเที่ยวของการเดินทางออกจากสถานี C (เส้นทาง A) และเที่ยวการเดินทางที่ 5-8 เป็นเที่ยวการเดินทางออกจากสถานี D (เส้นทาง B)โดยที่ขบวนรถที่ออกจากสถานี D สามารถถ่ายโอนให้ขบวนรถที่มาจากสถานี C หลังออกมาจากสถานีหลักได้ 20 นาที โดยหลักการในการทำเดฟิซิตฟังก์ชันที่พัฒนาคล้ายกับเดฟิซิตฟังก์ชันแบบดั้งเดิมและแบบขยาย โดยมีความต่างตรงที่จำนวนโมดูลที่ออกจากสถานีและกลับสู่สถานีมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อ x คือจำนวนโมดูลที่ออกจากสถานีและ y คือจำนวนโมดูลที่กลับเข้าสู่สถานี เมื่อนำข้อมูลตารางการเดินรถดังกล่าวไปสร้างเดฟิซิตฟังก์ชันได้ผลลัพธ์ออกมาในรูปที่ 5 เห็นได้ว่าสถานี C ต้องการจำนวนโมดูลในการให้บริการ D(C)=10 โมดูลและสถานี D ต้องการจำนวนโมดูลในการให้บริการ D(D)=12 โมดูลหมายความว่าในระบบโครงข่ายต้องการจำนวนโมดูลที่ให้บริการ MFS = D(C)+D(D)=22 โมดูล

4. กรณีศึกษา

วิธีที่ถูกเสนอในหัวข้อที่ 3 ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งมวลชนในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่(ขส.มช.) มีข้อมูลผู้ใช้บริการสูงสุดในปี 2563 อยู่ที่ 216,487 คน มีการให้บริการด้วยรถโดยสารประจำทาง มีเส้นทางการเดินรถทั้งหมด 9 เส้นทาง(ในปี 2565) โดยตารางการเดินรถมีการปรับเปลี่ยนทุกๆ เดือนโดยมีเส้นทางที่เหมาะสมกับระบบ AMPT ซึ่งถูกเลือก 2 เส้นทางเพื่อนำมาเป็นกรณีศึกษาโดยมีเงื่อนไขว่าทั้งสองเส้นทางต้องมีสถานีย่อยร่วมกันเพื่อเป็นจุดสับเปลี่ยนโมดูล พบว่า ขส.มช.สาย 2 (สีเขียวเข้ม) และสาย 6 (สีชมพู) มีลักษณะโครงข่ายที่สามารถนำเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาเข้ามาใช้ในกรณีศึกษาได้โดยมีสถานีที่ซ้อนทับกันตรงสถานีนิติศาสตร์ โดยข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลการเดินทางขึ้น-ลงในแต่ละสถานีย่อยของ ขส.มช.ทั้งสองสาย โดย ขส.มช.ทั้งสองสายมีระยะห่างของเวลาระหว่างขบวน (Headway)คือ 20 นาที มีระยะเวลาในการเดินทางครบรอบเท่ากันคือ 15 นาที มีสถานีหลักร่วมกัน ทั้ง 2 สายเป็นรถที่วิ่งทางเดียว(One-way) โดยออกแบบให้โมดูลที่ใช้มีขนาดความจุผู้โดยสารเท่ากับ 5 คน ขส.มช.สาย 2 ใช้เวลา 5 นาที และ ขส.มช.สาย 6 ใช้เวลา 7 นาทีในการเดินทางไปยังสถานีนิติศาสตร์ ตามลำดับ



รูปที่ 6 เส้นทางการเดินรถของขสมช. มหาวิยาลัยเชียงใหม่

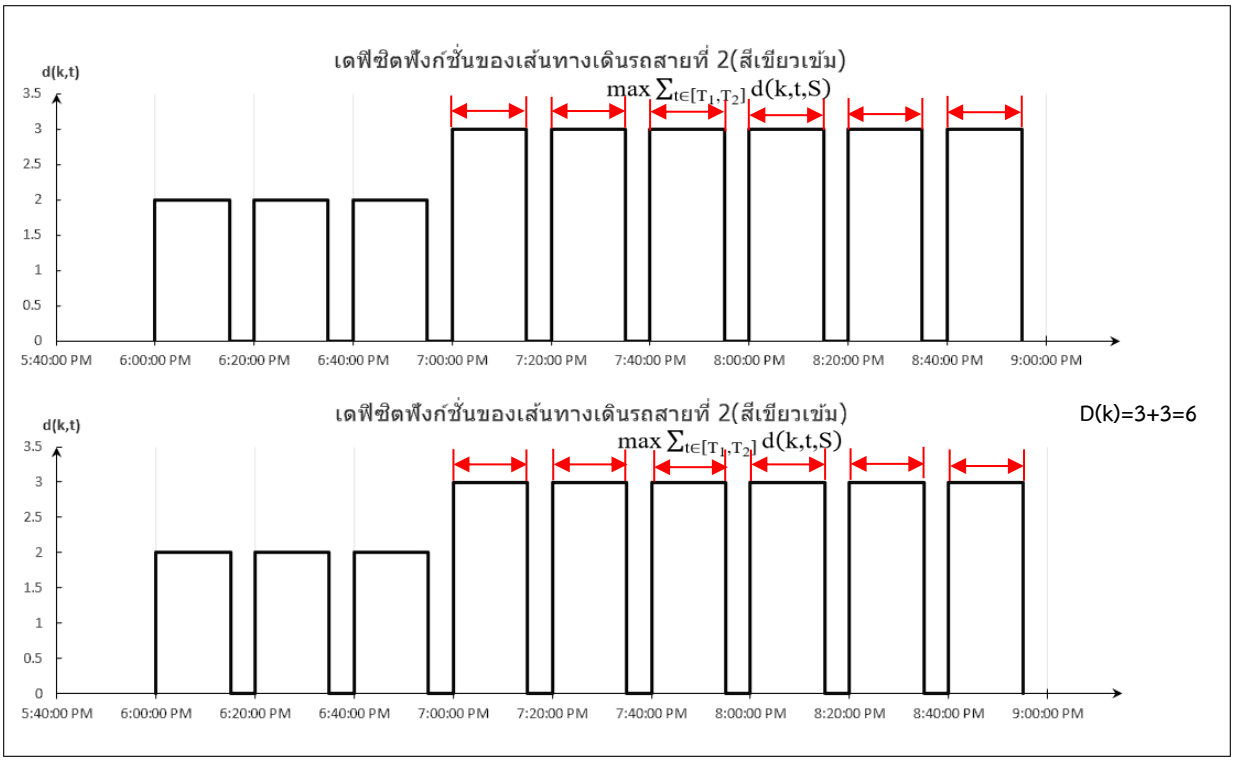
เมื่อนำไปสร้างเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยายที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของโมดูลในรูปที่ 7 โดยช่วงเวลาที่สนใจเป็นในช่วงที่มีผู้ใช้งานเยอะสุดอยู่ในช่วง $[T_1,T_2]$=[18:00,20:55] เดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยายมีจำนวนโมดูลแต่ละครั้งแต่ออกจากสถานีและกลับสู่สถานีมีจำนวนที่เท่ากัน ซึ่งสามารถหาจำนวนโมดูลที่ใช้โมดูลในการให้บริการจากสมการที่ 1 โดยจำนวนโมดูลสูงสุด D(k)=6 และผลที่ได้จากการทำเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาถูกแสดงออกมาอยู่ในรูปที่ 8 โดยต่างจากเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยายในด้านการเพิ่มและลดของจำนวนโมดูลที่เข้าและออกจากสถานีมีจำนวนไม่เท่ากัน ซึ่งจำนวนโมดูลที่ต้องใช้มีจำนวนเท่ากับ 5 โมดูล เห็นได้ว่าจำนวนโมดูลที่ใช้กับเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนามีจำนวนโมดูลที่ใช้น้อยกว่าเดฟิซิตฟังก์ชันแบบขยายจำนวน 1 โมดูล ซึ่งสามารถตีความได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเส้นทางของโมดูลระหว่างการให้บริการสามารถลดจำนวนโมดูลที่ต้องใช้ในการให้บริการได้ในกรณีที่สองเส้นทางการเดินรถมีสถานีหลักร่วมกัน

$$Min\ N = D(k) = max \sum_{t\in[T_1,T_2]} d(k,t,S) \quad (1)$$

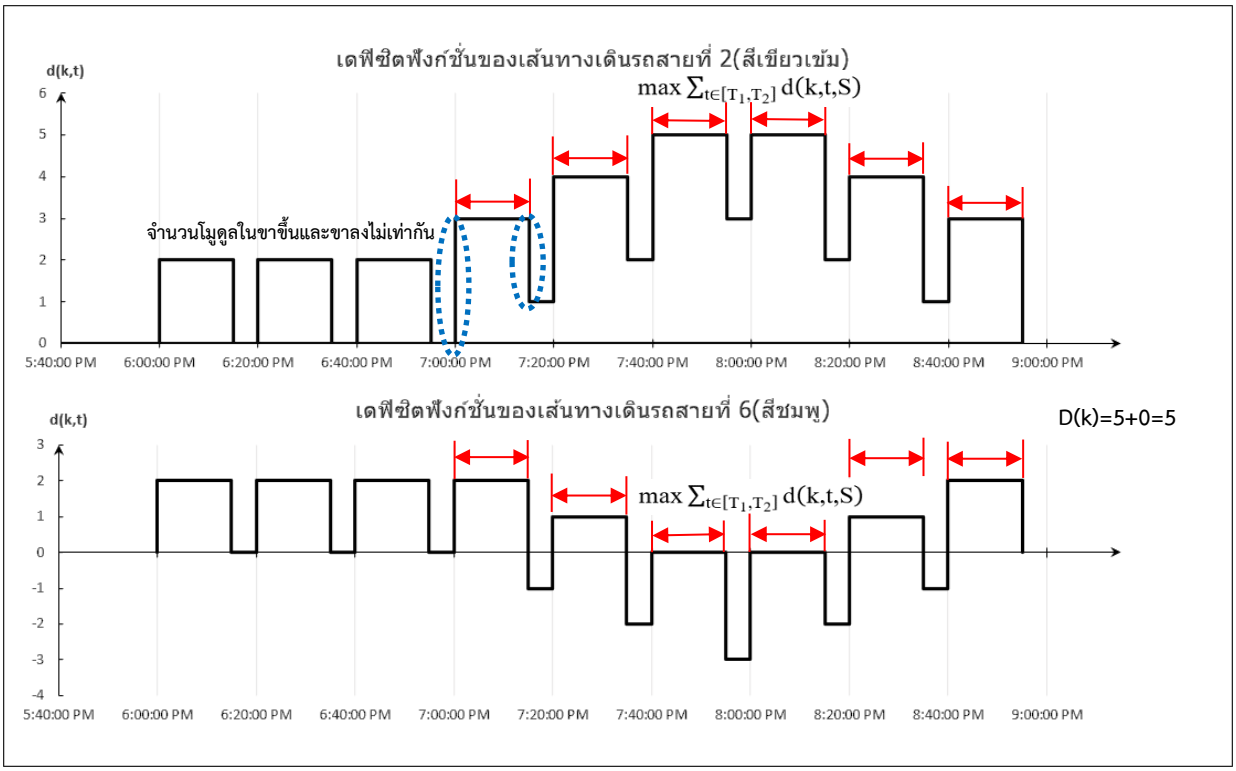
จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาสามารนำมาใช้กับปัญหาด้านการคำนวณยานพาหนะที่ใช้ในการให้บริการสำหรับ AMPT และสามารถช่วยในการแก้ปัญหาเชิงประสิทธิภาพ (Optimization) ที่พยายามลดจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการให้บริการในแต่ละช่วงเวลากรณีที่เส้นทางทั้งสองเส้นทางมีสถานีหลักร่วมกันในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกแสดงออกมาในรูปกราฟฟิกอย่างง่ายให้ผู้ที่ต้องการข้อมูลสามารถเข้าใจถึงจำนวนรถที่ต้องใช้ในแต่ละช่วงเวลา

5. สรุปผลการศึกษา

ด้วยการพัฒนาของเทคโนโลยีที่มีความหลากหลาย ทั้งในด้านเทคโนโลยียานยนต์ที่ไม่จำเป็นต้องมีคนขับ ด้านการสื่อสารที่มีความรวดเร็วและแม่นยำในการส่ง-รับข้อมูล เทคโนโลยีเหล่านี้ส่งเสริมให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ รวมไปถึงระบบขนส่งที่มีการพัฒนาในการนำ ระบบขนส่งสาธารณะ



รูปที่ 7 เดฟิชิตฟังก์ชันแบบขยาย(ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมดูลระหว่างการให้บริการ) ของสถานี D ที่มีเส้นทางการให้บริการสองเส้นทางได้แก่เส้นทางเดินรถสายที่ 2 และเส้นทางการเดินรถสายที่ 6



รูปที่ 8 เดฟิชิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาเมื่อภายในระบบไม่มีการสับเปลี่ยนโมดูลระหว่างการให้บริการของสถานี D ที่มีเส้นทางการให้บริการสองเส้นทางได้แก่เส้นทางเดินรถสายที่ 2 และเส้นทางการเดินรถสายที่ 6

ไร้คนขับแบบโมดูล (Autonomous Modular Public Transit: AMPT) เข้ามาใช้ในการให้บริการระบบขนส่งสาธารณะ ด้วยการนำ AMPT เข้ามาใช้ทำให้เกิดความยุ่งยากในการให้บริการมากขึ้น รวมไปถึงการคำนวณหาจำนวนยานพาหนะที่เหมาะสมในการให้บริการ

ในการศึกษานี้พัฒนาเดฟิซิตฟังก์ชันที่สามารถวิเคราะห์การสับเปลี่ยนโมดูลระหว่างสถานีย่อยในระบบ เพื่อรองรับการสับเปลี่ยนโมดูลระหว่างการให้บริการ โดยต่อยอดการพัฒนาของเดฟิซิตฟังก์ชันเดิมจาก Tao Liu et. al. (2020) ที่พิจารณาการสับเปลี่ยนโมดูลบริเวณต้น/ปลายเส้นทางการให้บริการ โดยเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาในงานศึกษานี้ถูกนำไปวิเคราะห์กรณีศึกษาระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาสามารถลดจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการให้บริการ

ในการศึกษาในอนาคตเป็นการนำเดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาไปใช้ในกรณีที่เป็นโครงข่าย AMPT ขนาดใหญ่มีจำนวนสถานีและเส้นทางให้พิจารณามากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการพัฒนา Excel หรือซอฟแวร์อื่นๆ เพื่อให้เดฟิซิตฟังก์ชันที่ถูกพัฒนาสามารถนำไปใช้กับ AMPT ได้สะดวกยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ หน่วยงานศูนย์บริหารจัดการเมืองอัจฉริยะ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลการทำวิจัยจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Jiaming Wu, Balázs Kulcsár, Selpi, & Xiaobo Qu (2021) A modular, adaptive, and autonomous transit system (MAATS): An in-motion transfer strategy and performance evaluation in urban grid transit networks, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 151, Pages 81-98.

[2] Liu, Tao & Ceder, Avishai & Rau, Andreas. (2018). Deployment planning of single-line modular-vehicle semi-rapid transit system.

[3] Kim, M., & Schonfeld, P.M. (2013). Integrating bus services with mixed fleets. *Transportation Research Part B-methodological, 55*, 227-244.

[4] Tao Liu, Avishai (Avi) Ceder, (2017), Deficit function related to public transport: 50 years retrospective, new developments, and prospects, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 100, Pages 1-19.

[5] Liu, T., Ceder, A. (Avi), & Rau, A. (2020). Using Deficit Function to Determine the Minimum Fleet Size of an Autonomous Modular Public Transit System. *Transportation Research Record*, *2674*(11), 532–541.