

วิศวกรรมงานทางแบบบูรณาการในการประเมินสภาพถนนลาดยางไทยแบบมีชีวิต

Integrated Pavement Engineering for Evaluation of Thai Asphalt Roads by the Way of Life

พุทธิพล ทองอินทร์ดำ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 0-2549-4697 โทรสาร: 0-2549-3412 E-mail: puttapon.t@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ในการประเมินสภาพกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางในปัจจุบันเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (FWD) ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ขณะที่การประมวลผลข้อมูลค่าความยุบตัวของผิวทางให้มีประสิทธิภาพยังคงเป็นปัญหาที่ท้าทายความสามารถของวิศวกรผิวทาง เพื่อให้การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นโครงสร้างผิวทางลาดยางมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผู้เขียนได้พัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับชื่อแกมเล็ต (GAMLET) ขึ้นโดยใช้องค์ความรู้และเทคนิคแบบใหม่ of ชั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งในโปรแกรมดังกล่าวชั้นทางของถนนลาดยางจะถูกกำหนดให้มีชุดโครโมโซมประจำตัวเหมือนสิ่งมีชีวิตประเภทหนึ่ง จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อกำหนดสภาวะแวดล้อมให้สอดคล้องกับปัญหาการคำนวณย้อนกลับ ระบบกลไกที่ลอกเลียนการคัดสรรของธรรมชาติและวิธีทางพันธุกรรมที่ใช้ในโปรแกรมแกมเล็ตจะสามารถพัฒนาชุดโครโมโซมดังกล่าวจากรุ่นสู่รุ่นเพื่อค้นหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนนที่เหมาะสมจะเป็นคำตอบมากที่สุดได้ บทความนี้นำเสนอรายละเอียดของการพัฒนาโปรแกรมแกมเล็ตและการประยุกต์ใช้เพื่อ

ประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าโปรแกรมแกมเล็ตสามารถประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางถนนลาดยางที่ใช้อยู่ในประเทศไทยได้อย่างดีเยี่ยม โดยค่า Root Mean Square Error < 0.1 % เทียบกับข้อมูลตั้งต้นที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ ทั้งยังมีศักยภาพในหลายๆด้านดีกว่าโปรแกรมคำนวณย้อนกลับแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางที่มีความถูกต้องที่ได้จากโปรแกรมแกมเล็ตจะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์หาค่าอายุการใช้งานที่เหลือของถนนลาดยางหรือใช้ในการคำนวณออกแบบเพื่อเสริมความแข็งแรงอันจะเป็นข้อมูลสำคัญที่จะทำให้สามารถบริหารจัดการโครงการด้านการรักษาและซ่อมแซมโครงข่ายถนนลาดยางในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ : การคำนวณย้อนกลับ ชั้นตอนวิธีเชิง

พันธุกรรม ถนนลาดยางไทย โมดูลัส
ยืดหยุ่นชั้นทาง

Abstract

For evaluation of the pavement bearing capacity the Falling Weight Deflectometer (FWD) equipment has been developed and widely used. At the same time interpretation of the obtained FWD-deflection basin effectively is still a big challenge for pavement engineers. In order to improve the effectiveness of this task the author has developed a new backcalculation software named "GAMLET" using several new techniques of genetic algorithms (GA). In GAMLET all examined asphalt road structures are converted into chromosome strings. It has been found that under the suitable setting of backcalculation parameters the algorithms used in GAMLET are able to develop those chromosomes. The desired layer elastic moduli of the measured asphalt road can be converted from the most appropriate chromosome. This paper discusses the detail of GAMLET and its application with Thai asphalt roads. The results show that GAMLET has great ability to evaluate bearing capacity of Thai asphalt roads with the root mean square error $< 0.1\%$. Additionally, GAMLET has more advantages compared to conventional backcalculation programs. The accurate backcalculated layer moduli obtained from GAMLET should be very useful for other calculations e.g. remaining life and overlay

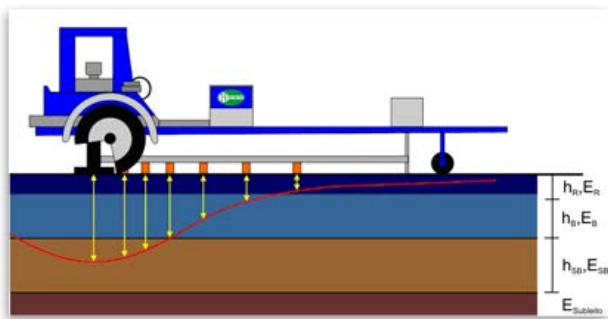
design. This should lead to the effectiveness of pavement management system.

Keywords: Backcalculation, Genetic Algorithms, Thai asphalt roads, Elastic layer moduli

บทนำ

ในสภาวะของประเทศไทยที่ปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ทำให้รัฐต้องสูญเสียงบประมาณในการรักษาซ่อมแซมถนนเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ด้วยเหตุนี้การบริหารจัดการโครงการซ่อมแซมทางหลวงให้สามารถตอบสนองความต้องการของสังคมได้อย่างคุ้มค่าเงินภาษีของประชาชนจึงถือเป็นงานที่ท้าทายความสามารถของหน่วยงานผู้รับผิดชอบ ซึ่งหนึ่งในกุญแจสำคัญสู่เป้าหมายดังกล่าวก็คือการประเมินสภาพกำลังรับน้ำหนักผิวทางที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง (Layered elastic moduli) ถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานวิศวกรรมทางให้เป็นค่าชี้วัดความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทาง โดยในช่วงสองสามทศวรรษที่ผ่านมาวิธีการทดสอบหาลำดับรับน้ำหนักผิวทางโดยใช้เครื่องมือวัดค่าความยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ถูกนำมาใช้ในหลายประเทศทั่วโลกรวมทั้งในประเทศไทย [1] เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวได้รับการยอมรับว่ามีความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าอยู่ในระดับที่ดี ทั้งยังสามารถจำลองขนาดน้ำหนักและความเร็วของยานพาหนะที่ต้องการได้จากการปรับขนาดและความสูงของการปล่อยตุ้มน้ำหนักที่ตกกระแทกบนผิวทาง โดยมีอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Sensor)

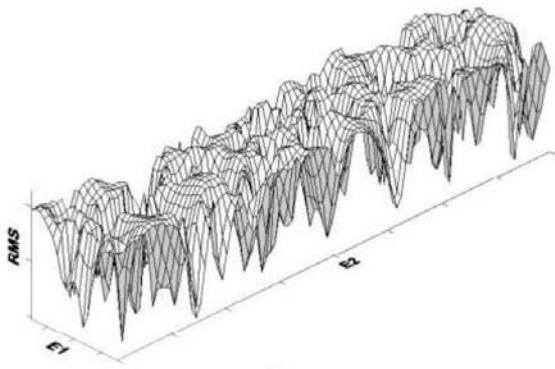
โดยปกติ 6 ถึง 9 ตัวที่ทำหน้าที่วัดค่าการยุบตัวที่ผิวทางดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้การตรวจสอบสภาพความแข็งแรงของชั้นทางที่อยู่ด้านล่างซึ่งปกติไม่สามารถตรวจสอบได้จากภายนอกนั้นมีความรวดเร็วและน่าเชื่อถือมากขึ้นเทียบกับเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing, NDT) ประเภทอื่นๆ เช่น Benkelman beam, Dynaflect, Lacroix deflectograph เป็นต้น ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของการตรวจสอบชั้นทางที่อยู่ด้านล่างของถนนลาดยางโดยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายนี้ ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้หน่วยงานผู้เกี่ยวข้องกับการดูแลรักษาถนนลาดยางรู้เท่าทันสามารถป้องกันและแก้ไขปัญหาการทรุดตัวแบบกะทันหันด้านล่างที่อาจเกิดขึ้นได้อันจะนำมาซึ่งความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้ทาง



รูปที่ 1 เครื่องวัดค่าความยุบตัวโดยลูกตุ้มกระแทก (FWD)

โดยในทางทฤษฎีค่าการยุบตัวที่วัดได้สามารถนำมาใช้เป็นค่านำเข้าของวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับค่าความหนาและค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของแต่ละชั้นทางทำให้หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นโครงสร้างทางในสนามขณะรับน้ำหนักได้ ทั้งนี้โปรแกรมคำนวณย้อนกลับที่ใช้ในภาคปฏิบัติการส่วนใหญ่ใช้ทฤษฎียืดหยุ่นของชั้นทาง

(Multilayered Elastic Theory) เป็นแบบจำลองของการคำนวณแบบเดินหน้า และหาค่าคำตอบโดยการวนซ้ำลดค่าความแตกต่างระหว่างค่ายุบตัวที่ได้จากแบบจำลองและค่าวัดจริง โดยกระบวนการทั้งหมดจะเริ่มจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางชุดแรก (Seed moduli) ที่นำเข้าโดยผู้ใช้ แต่ในทางปฏิบัติปัญหามักเกิดขึ้นเมื่อคำตอบที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับขัดแย้งกับมุมมองทางวิศวกรรม [2] ปัญหานี้เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ โดยหนึ่งในสาเหตุหลักก็เนื่องจากพื้นผิวคำตอบของปัญหาการคำนวณย้อนกลับนั้นมีความซับซ้อนและประกอบด้วยจุดต่ำสุดเฉพาะที่จำนวนมาก (Local minima) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างพื้นผิวคำตอบของระบบชั้นทาง 2 ชั้นที่ใช้ค่า Root mean square error เป็นตัวชี้วัดคำตอบจากลักษณะดังกล่าวทำให้ค่าโมดูลัสเริ่มแรกจากผู้ใช้มีอิทธิพลอย่างมากกับค่าคำตอบจากโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับที่ไม่มีศักยภาพในการค้นหาจุดต่ำสุดโดยรวม (Global minimum) ทำให้วิศวกรและนักวิจัยหลายท่านจากทั่วโลกได้พยายามใช้การบูรณาการนำเอาความรู้ด้านขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) มาประยุกต์ใช้กับการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง [3] ซึ่งผลคำตอบที่ได้จากการวิจัยเหล่านั้นชี้ให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีศักยภาพที่ดีในการค้นหาจุดต่ำสุดโดยรวม แต่ในขณะที่เทคโนโลยีด้านขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก การพัฒนาปรับปรุงโปรแกรมคำนวณย้อนกลับที่ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวกลับมีน้อยมาก ทำให้โปรแกรมเหล่านั้นไม่เป็นที่รู้จักมากเท่าที่ควรในกลุ่มผู้ปฏิบัติงาน



รูปที่ 2 ตัวอย่างพื้นผิวคำตอบของระบบชั้นทาง 2 ชั้น [4]

ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนจึงได้พัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับชื่อเกมเล็ทซ์ขึ้น โดยยังคงใช้ทฤษฎียึดหยุ่นของชั้นทางเป็นแบบจำลองของการคำนวณแบบเดินหน้าเพื่อให้โปรแกรมมีความรวดเร็วอันเป็นลักษณะที่เหมาะสมกับงานที่ต้องวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก ส่วนกระบวนการคำนวณย้อนกลับนั้นได้ประยุกต์ใช้เทคนิคแบบใหม่ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมโดยมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของผิวทางลาดยางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

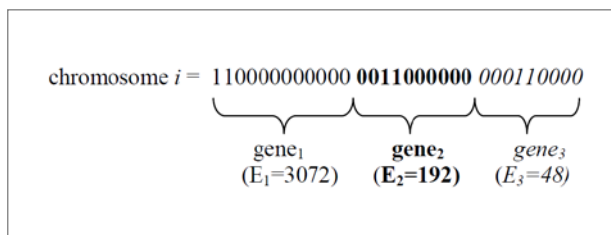
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในกระบวนการคำนวณย้อนกลับ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งเป็นระเบียบวิธีทางตัวเลขที่ลอกเลียนระบบการคิดสรรหาผู้อยู่รอดของธรรมชาติและวิถีทางพันธุกรรมนั้นถูกนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมอย่างมาก โดยบทความวิชาการด้านวิศวกรรมผิวทางชิ้นแรกที่แสดงการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณย้อนกลับถูกนำเสนอโดย Fwa และคณะ ในปี ค.ศ. 1997 [5] ซึ่งได้มีการพัฒนาโปรแกรม

NUS-GABACK ขึ้น โดยหลังจากนั้นเพียง 1 ปี Kameyama และคณะ [6] ได้นำเสนอโปรแกรม GA ที่พัฒนาขึ้นเช่นกัน จนปี ค.ศ. 2002 โปรแกรมคำนวณย้อนกลับ BACKGA ก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Reddy และคณะ [7] ต่อจากนั้น Tsai และคณะ [8] ก็ได้ตีพิมพ์บทความในปี ค.ศ. 2004 แสดงการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมกับปัญหาด้านวิศวกรรมงานทาง จนปี ค.ศ. 2006 และ 2007 Park และคณะ [9] และ Alkasawneh [4] ก็ได้พัฒนาโปรแกรมคำนวณย้อนกลับชื่อ GAPAVE และ BACKGENETIC3D ขึ้นตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 โปรแกรมต่างก็ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นพื้นฐานเช่นเดียวกัน

โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าโปรแกรมคำนวณย้อนกลับส่วนใหญ่ที่กล่าวข้างต้นใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm) หรือ SGA เป็นเครื่องมือในการค้นหาค่าคำตอบ ซึ่งการประยุกต์ใช้ SGA ในการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสของถนนลาดยางนั้นจะมีขั้นตอนพื้นฐานดังต่อไปนี้ [3]

- 1) การสุ่มสร้างกลุ่มประชากร: โดยการกำหนดขอบเขตค่าโมดูลัสคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละชั้นทาง กลุ่มโครงสร้างทางที่มีโอกาสเป็นคำตอบได้จะถูกสุ่มผลิตขึ้นเท่ากับจำนวนประชากร (ตัวแปร numpop) ที่ผู้ใช้กำหนด โดยค่าโมดูลัสยึดหยุ่น (ตัวแปร E) ของแต่ละโครงสร้างจะถูกแปลงให้เป็นสายโครโมโซมโดยระบบเลขฐานสอง ซึ่งแต่ละยีนส์จะระบุค่าโมดูลัสยึดหยุ่นของแต่ละชั้นทางดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นระบบถนนลาดยาง 3 ชั้น



รูปที่ 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับรหัสโครโมโซมของถนนลาดยาง 3 ชั้น

2) การประเมินค่าความเหมาะสม: แต่ละโครงสร้างถนนลาดยางที่ถูกสุ่มผลิตขึ้นจะถูกประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness value) ซึ่งวิธีที่ใช้โดยส่วนใหญ่อาศัยการเปรียบเทียบระหว่างค่าความยวบตัวที่ได้จากแบบจำลองแบบดินเหนียวกับค่าวัดจริงจากเครื่อง FWD โดยใช้ค่า Root mean square error (RMSE) มักจะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดความคลาดเคลื่อน

3) การคัดเลือกประชากร: โครงสร้างถนนจะถูกคัดเลือกเพื่อเข้าสู่กระบวนการขยายพันธุ์โดยวิธีวงล้อหมุน (Roulette-wheel) ซึ่งโอกาสในการถูกเลือกจะแปรผันตามค่าความเหมาะสมที่ถูกประเมินไว้ โดยวิธีนี้โครงสร้างที่มีความเหมาะสมมากกว่าก็จะมีโอกาสขยายพันธุ์ได้มากกว่า ขณะที่โครงสร้างที่มีความเหมาะสมน้อยก็จะสูญพันธุ์ไปในที่สุด

4) การผสมข้ามแบบจุดเดียว (Single-point crossover): จากค่าร้อยละของความเป็นไปได้ของการผสมข้ามแบบจุดเดียว (pcross) ที่กำหนดโครงสร้างที่ถูกเลือกจะถูกจับคู่แบบสุ่มและผสมข้ามที่จุดใดจุดหนึ่งบนสายโครโมโซมเพื่อกำเนิดโครงสร้างทายาท (Offspring) เป็นรุ่นต่อไป

5) การเปลี่ยนแปลงยีนแบบกระโดด (Jump mutation): ค่าร้อยละของความเป็นไปได้ที่กำหนด (pjumpmu) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงยีนแบบกระโดดในบางโครงสร้างทายาท กล่าวอีกอย่างก็คือ

การเปลี่ยนค่า 0 ให้เป็น 1 หรือกลับกัน ณ ตำแหน่งสุ่มใดๆบนสายโครโมโซม โดยกระบวนการนี้จะช่วยให้การค้นหาค่าตอบไม่ติดอยู่กับจุดต่ำสุดเฉพาะที่ใดๆ

กระบวนการผลิตโครงสร้างทายาทจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนจำนวนประชากรครบตามจำนวนตั้งต้นซึ่งโดยปกติจะทำให้ได้ประชากรรุ่นใหม่ที่มีคุณภาพดีขึ้น การพัฒนาของประชากรจากรุ่นสู่รุ่นจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆจนกว่าจะพบโครงสร้างถนนลาดยางที่เหมาะสมโดยเป็นไปตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ เช่น $RMSE_{\text{จำนวนได้}} < \text{ค่า } RMSE_{\text{ที่ยอมให้}}$ เป็นต้น

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมกับการคำนวณย้อนกลับในบทความวิจัยต่างๆที่กล่าวข้างต้นชี้ให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีศักยภาพที่ดีในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนนี้ ซึ่งในขณะที่ยังคงความรู้ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้พัฒนามากขึ้นไปเรื่อยๆทำให้เกิดเทคนิคใหม่ๆ และยังทำให้พบข้อดีของบางประการของ SGA แต่รายงานการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับด้วยองค์ความรู้ใหม่ดังกล่าวเพื่อให้มีศักยภาพยิ่งขึ้นกลับพบน้อยมาก ผู้เขียนจึงได้พัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับชื่อ เกมเล็ตขึ้น

โปรแกรมการคำนวณย้อนกลับ เกมเล็ต (GAMLET)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เกมเล็ตถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Digital Fortran ขนาดโดยประมาณ 5,800 บรรทัดต่อ 1 ชุดการทำงาน โดยใช้การคำนวณค่ายวบตัวตามทฤษฎียืดหยุ่นของชั้นทาง (Multilayered Elastic Theory, MLET) เป็นแบบจำลองของการคำนวณแบบดินเหนียว โดยชื่อ

โปรแกรม GAMLET คือ GA + MLET ซึ่งสื่อถึงการคำนวณแบบย้อนกลับที่ใช้ GA และการคำนวณแบบเดินหน้าที่ใช้ MLET นั่นเอง การแปลงค่าไปกลับระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นสายโครโมโซมแบบเลขฐานสอง ด้วยคุณสมบัติของการคำนวณแบบเดินหน้าที่ใช้ทำให้โปรแกรมแกมเล็ตสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มีชั้นทางได้มากถึง 30 ชั้น แต่เพื่อให้ค่าคำตอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือและสอดคล้องกับการทำงานในภาคปฏิบัติผู้เขียนแนะนำให้ใช้จำนวนชั้นทางสูงสุดไม่มากกว่าจำนวนอุปกรณ์อ่านค่าวัดการยุบตัว (Sensors) ของเครื่อง FWD ซึ่งโดยทั่วไปมีจำนวน 8 หรือ 9 ตัว สำหรับคุณลักษณะที่โดดเด่นของโปรแกรมแกมเล็ตสามารถสรุปได้ดังนี้

1) แบบจำลองชั้นทาง: ผู้ใช้สามารถเลือกใช้แบบจำลองชั้นทางแบบทั่วไปที่สมมติความลึกของดินคันทางมีค่าไม่สิ้นสุด (Infinite depth) หรือจะเลือกใช้วิธี CSCM [3] เพื่อคำนวณหาชั้นดินแข็งหรือชั้นหิน (Bedrock) ได้ผิวทางได้โดยอัตโนมัติจากข้อมูลการยุบตัวที่ได้จากเครื่อง FWD

2) การประเมินค่าความเหมาะสม: เพื่อให้การคัดสรรโครงสร้างทางผิวทางที่อยู่ในรูปประชากรมีความละเอียดถูกต้องมากยิ่งขึ้น โปรแกรมแกมเล็ตไม่ได้ใช้เพียงสมการเดียวในการประเมินค่าความเหมาะสม ซึ่งเป็นลักษณะที่ใช้อยู่ในโปรแกรมคำนวณย้อนกลับส่วนใหญ่ แต่แกมเล็ตใช้ค่าจาก 3 สมการดังแสดงด้านล่างนี้ในแบบขนาน เพื่อชี้วัดค่าความเหมาะสมของประชากรแต่ละสายโครโมโซม

$$\text{ค่าน้อยสุดของ } f_1 = \max.of \left| \frac{(d_i - D_i)}{D_i} \right| * 100 \quad (1)$$

$$\text{ค่าน้อยสุดของ } f_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - D_i}{D_i} \right)^2} * 100\% \quad (2)$$

$$\text{ค่ามากที่สุดของ } f_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{OBJ}{10^6} \right)} \quad (3)$$

โดย

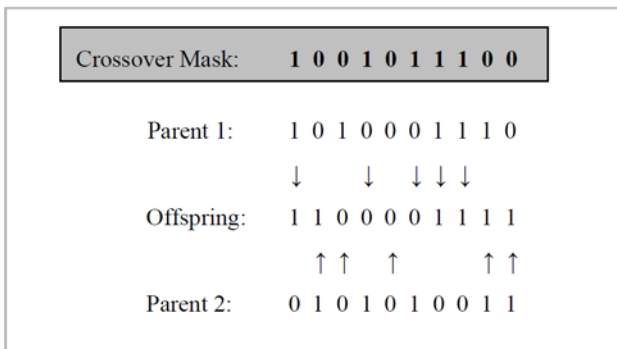
$$OBJ = \sum_{i=1}^N (d_i - D_i)^2 \quad (4)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว d_i และ D_i คือค่าการยุบตัวของผิวทางที่คำนวณได้และที่วัดได้จริงที่อุปกรณ์วัดค่าที่ i ตามลำดับ

โดยภาพรวมจะพบว่าทั้ง 3 สมการใช้การเปรียบเทียบค่ายุบตัวที่คำนวณได้กับค่าวัดจริงเป็นหลัก แต่หากพิจารณาในรายละเอียดจะเห็นได้ว่าค่า f_1 ที่ได้จากสมการที่ (1) จะเป็นค่าบ่งชี้ความคลาดเคลื่อนเฉพาะตำแหน่งที่เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุดบนเส้นการยุบตัวของผิวทาง ในขณะที่ค่า f_2 ซึ่งก็คือค่า Root mean square error และ f_3 แสดงความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพิจารณาเส้นการยุบตัวโดยรวมทั้งเส้นนั่นเอง โดยค่าที่สมบูรณ์แบบของทั้ง 3 ฟังก์ชันคือ 0.0, 0.0 และ 1.0 ตามลำดับ

1) การคัดเลือกประชากร: เนื่องจาก Goldberg และ Deb [10] ได้รายงานในบทความวิจัยว่าวิธีการคัดเลือกแบบ Tournament มีประสิทธิภาพมากกว่าและต้องการกลุ่มประชากรน้อยกว่าในการหาคำตอบเทียบกับวิธี Roulette-wheel ที่ใช้ใน SGA ดังนั้นแกมเล็ตจึงใช้วิธี Tournament ในการคัดเลือกประชากร โดยในวิธีนี้ประชากร (โครงสร้างถนน) จะถูกสุ่มจับคู่เพื่อเปรียบเทียบค่าความเหมาะสม ซึ่งโครงสร้างที่มีค่าความเหมาะสมมากกว่าจะได้รับคัดเลือกสู่การขยายพันธุ์

2) การผสมข้าม: จากการเปรียบเทียบการผสมข้ามแบบต่างๆโดย Syswerda [11] พบว่าการผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ (Uniform crossover) มีประสิทธิภาพโดดเด่น ดังนั้นนอกจากการผสมข้ามแบบจุดเดี่ยวแล้วแกมเล็ตจึงบรรจุการผสมข้ามแบบสม่ำเสมอเอาไว้ด้วย ซึ่งในวิธีดังกล่าวแม่แบบการผสมข้าม (Crossover mask) จะถูกสุ่มผลิตขึ้น โดยหากค่าในแม่แบบมีค่าเป็น 1 ค่าในยีนส์ของผู้ให้กำเนิดที่ 1 ณ ตำแหน่งนั้นจะถูกคัดลอกสู่ทายาท และ ณ ตำแหน่งที่มีค่าในแม่แบบเป็น 0 ค่าในยีนส์จากผู้ให้กำเนิดที่ 2 จะถูกคัดลอกสู่ทายาท ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ (Uniform crossover)

3) การเปลี่ยนแปลงค่ายีนส์: นอกจากการเปลี่ยนแปลงค่ายีนส์แบบกระโดดแล้ว โปรแกรมแกมเล็ตได้เพิ่มวิธีการเปลี่ยนแปลงค่ายีนส์แบบคืบ (Creep mutation) โดยทั้งสองวิธีสามารถใช้ร่วมกันหรือแยกใช้แบบใดก็ได้ ในการเปลี่ยนแปลงแบบคืบ (ตัวแปร $p_{creepmu}$) ยีนส์ที่ถูกเลือกแบบสุ่มจะถูกแปลงกลับเป็นค่าโมดูลัสยึดหยุ่นขั้นทางและสุ่มขยับให้มีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงไป 1 ขั้น ด้วยวิธีนี้ทำให้กระบวนการค้นหาไม่ติดอยู่กับจุดต่ำสุดเฉพาะที่ใดๆ ทั้งยังคงรักษาแนวทางการลู่อู่หาคำตอบให้ไม่กระโดดมากเกินไปได้

4) วิธีกลุ่มเฉพาะ (Niche method): เพื่อเพิ่มศักยภาพในการตรวจสอบพื้นที่คำตอบที่มีจุดต่ำสุดเฉพาะที่จำนวนมาก เช่นปัญหาการคำนวณย้อนกลับ วิธีกลุ่มเฉพาะถูกบรรจุไว้ในโปรแกรมแกมเล็ต โดยใช้พื้นฐานจากฟังก์ชันการแบ่งแบบสามเหลี่ยมของ Goldberg และ Richardson [12] โดยวิธีดังกล่าวจะทำให้กลุ่มประชากรที่มีอยู่ถูกแบ่งออกเพื่อตรวจสอบจุดต่ำสุดหลายๆ จุดได้ในเวลาเดียวกัน

5) การคัดเลือกผู้นำ (Elitism technique): โดยการใช้เทคนิคการคัดเลือกผู้นำทำให้โปรแกรมแกมเล็ตสามารถตรวจสอบหาคำคำตอบที่ดีที่สุดให้เป็นผู้นำในแต่ละรุ่นได้ โดยผู้นำจะได้รับสิทธิพิเศษให้ดำรงอยู่ในรุ่นถัดไปได้โดยอัตโนมัติจนกว่าผู้นำที่แข็งแกร่งกว่าจะถือกำเนิดขึ้น โดยวิธีนี้ทำให้แกมเล็ตพบโครงสร้างชั้นทางที่เป็นคำตอบได้รวดเร็วขึ้นอย่างมาก

สำหรับคุณสมบัติเด่นอื่นๆ ในโปรแกรมแกมเล็ต เช่น FWDLine, Micro GA, CSCM ที่ผู้เขียนได้พัฒนาเพิ่มขึ้นล้วนเป็นคุณสมบัติการทำงานที่อยู่นอกเหนือขอบเขตการทดสอบในบทความวิจัยนี้ ดังนั้นไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้

ประสิทธิภาพของโปรแกรมแกมเล็ต

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมแกมเล็ต ผู้เขียนได้ใช้ข้อมูลในบทความวิจัยของ Harichandran และคณะ [13] เป็นฐานข้อมูล โดยในบทความดังกล่าวได้แสดงการเปรียบเทียบผลคำตอบของโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางหลายโปรแกรม ได้แก่ MICHBACK, MODULUS, EVERCALC, EVERCAL-Alt เนื่องจากโปรแกรมเหล่านี้ไม่ได้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็น

พื้นฐาน จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ค่าโมดูลัสเริ่มแรก (Seed moduli) เพื่อเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม ในทางกลับกันโปรแกรมแกมเล็ตทอาศัยเพียงแค่ช่วงค่าโมดูลัสที่เป็นไปได้ของแต่ละชั้นทางในการเริ่มต้น ด้วยสาเหตุนี้ทำให้คำตอบจากแกมเล็ตปราศจากอิทธิพลที่เกิดจากโมดูลัสเริ่มแรกที่กำหนดโดยผู้ปฏิบัติงาน

ตารางที่ 1 แสดงคำตอบที่ได้จากทุกโปรแกรม โดยโครงสร้างที่วิเคราะห์เป็นถนนลาดยาง 4 ชั้นที่มีการเสริมความแข็งแรงที่ชั้นรองพื้นทาง ทั้งนี้ ΔM แสดงค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากโมดูลัสคำตอบที่คลาดเคลื่อนมากที่สุดของแต่ละโปรแกรมซึ่งแสดงด้วยสัญลักษณ์ * และค่า Root mean square error (RMSE) แสดงร้อยละของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการยุบตัวที่ได้จากทั้งโครงสร้างหรือทั้ง 4 ชั้นทางในกรณีนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลคำตอบจากโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ [3]

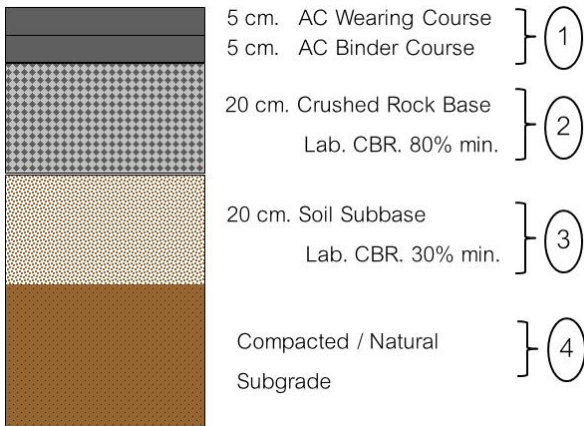
โปรแกรม	ค่าโมดูลัสยึดหยุ่นชั้นทาง (MPa)				Max ΔM^* (%)	RMSE (%)
	AC	Base	Reinf. Subbase	Sub-grade		
ค่าโมดูลัสตั้งต้น	3447.38	172.37	31026.40	51.71	-	-
Michback	3444.31	172.29	30839.30*	51.67	0.60	0.030
Modulus	3392.90	175.13	30354.10*	51.71	2.17	0.078
Evercalc	4293.42*	190.71	27300.90	51.39	24.54	0.753
Evercalc-alt	3388.46	176.00*	30423.60	51.79	2.10	0.105
GAMLET	3447.90	172.13	31145.99*	51.68	0.38	0.009

ผลจากตารางที่ 1 พบว่าหากพิจารณาค่า RMSE เป็นหลักแล้ว โปรแกรม GAMLET ให้คำตอบที่มีความถูกต้องมากที่สุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 0.009% ตามด้วย MICHBACK, MODULUS, EVERCAL-Alt และโปรแกรม EVERCALC ตามลำดับ ผลในตารางยังแสดงให้เห็นทราบว่าในขณะที่ค่า RMSE มีค่าต่ำเป็นที่น่าพอใจ (ค่า RMSE = 1-3% ถูกใช้เป็นค่าที่ยอมรับได้ในหลายโครงการ [4]) ค่าโมดูลัสที่คำนวณได้ของบางชั้นทางอาจยังคงคลาดเคลื่อนได้มาก เช่น

ชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้จาก EVERCALC มีค่าผิดพลาดของชั้นทางมากที่สุด (ΔM) ซึ่งมากกว่า 25% ในขณะที่ GAMLET มีค่า ΔM เพียง 0.38% ซึ่งให้เห็นว่าเทคนิคการประเมินความเหมาะสมร่วมกันจากหลายฟังก์ชัน (สมการ (1), (2) และ (3)) และเทคนิคอื่นๆที่ใช้ในแกมเล็ตสามารถเพิ่มศักยภาพในการหาค่าคำตอบที่ถูกต้องได้เป็นอย่างดี

การประยุกต์ใช้โปรแกรมแกมเล็ตกับโครงสร้างถนนลาดยางไทย

เพื่อแสดงการประยุกต์ใช้โปรแกรมคำนวณย้อนกลับแกมเล็ตกับการประเมินสภาพกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย โครงสร้างถนนลาดยางของทางหลวงหมายเลข 3100 ช่วงต่อจากแยกทางหมายเลข 346 ในจังหวัดปทุมธานี [14] ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ โดยถนนลาดยางเส้นดังกล่าวมีรายละเอียดโครงสร้างชั้นทางดังแสดงในรูปที่ 5 โดยชั้น AC wearing course และ AC binder course เป็นชั้นทางที่มีความหนาไม่มากและมีความแข็งแรงใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆด้านล่าง จึงพิจารณาให้รวมเป็นชั้นเดียวกันเพื่อลดปัญหาที่จะเกิดจากความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของชั้นทางที่มีความหนาไม่มาก (Sensitive problem) ทำให้ได้จำนวนชั้นทางที่จะใช้ในการวิเคราะห์เป็น 4 ชั้นทางดังแสดงในรูปที่ 5



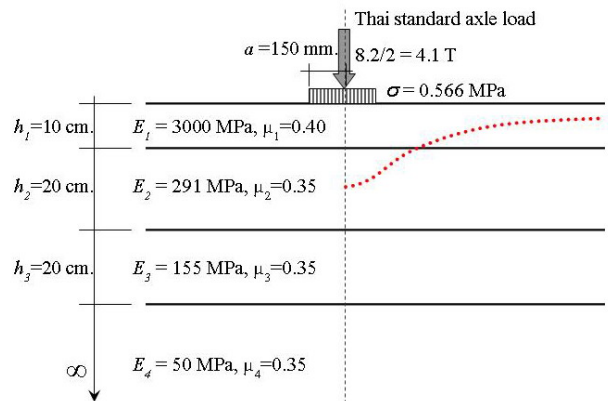
รูปที่ 5 รายละเอียดโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางหมายเลข 3100

การทดสอบโปรแกรมแกมเล็ตกับโครงสร้างถนนลาดยางใน จ.ปทุมธานี ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการจัดโครงสร้างของถนนลาดยางในรูปที่ 5 ให้อยู่ในรูปของแบบจำลองชั้นทางที่มีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง ซึ่งได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ค่าความหนา (h) และอัตราส่วนปัวซอง (μ) สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นแอสฟัลติกคอนกรีต กำหนดให้เท่ากับ 3,000 MPa ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงแนะนำของ AASHTO [15] และสำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางสามารถประมาณค่าได้จากค่า CBR ที่ใช้ก่อสร้างโดยใช้ความสัมพันธ์ที่แนะนำโดย AASHTO [15] ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$M_R \approx 2555 \cdot \text{CBR}^{0.64} \quad [\text{หน่วย psi}] \quad (5)$$

โดย M_R เป็นค่า Resilient modulus ของวัสดุในชั้นทาง ซึ่งทำให้ประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางได้ 291 MPa และ 155 MPa ตามลำดับ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินคั่นทางในแบบจำลองกำหนดให้เท่ากับค่าความแข็งแรงเฉลี่ย

ของดินคั่นทาง 50 MPa [16] สำหรับค่าอัตราส่วนปัวซองของนั้นเป็นที่ทราบดีว่ามีอิทธิพลน้อยมากกับกระบวนการคำนวณย้อนกลับ [2] ดังนั้นการใช้ค่าอัตราส่วนปัวซองของโดยประมาณที่เหมาะสมจึงถือว่าเพียงพอ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำโดย Hothan [2] แบบจำลองชั้นทางที่กำหนดคุณสมบัติโดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆนี้ จะใช้ในการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ BISAR [17] ซึ่งสามารถจำลองการทดสอบชั้นทางด้วยเครื่อง FWD หาค่าการยุบตัวบนผิวทางโดยใช้ทฤษฎียืดหยุ่นชั้นทางได้ สำหรับค่าน้ำหนักที่ใช้ในการจำลองเท่ากับน้ำหนักเพลามาตรฐานที่ใช้ในประเทศไทย 8.2 ตัน กระทำบนพื้นผิวสัมผัสขนาดรัศมี 150 มม. ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองการทดสอบด้วยเครื่อง FWD บนโครงสร้างทางหลวงหมายเลข 3100 ด้วยโปรแกรม BISAR

เมื่อกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวของเครื่อง FWD ที่ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 mm โปรแกรม BISAR หาค่าการยุบตัวของชั้นทางในรูปที่ 6 ได้เท่ากับ 836.70, 706.30, 619.40, 509.60, 420.70, 291.10, 208.50, และ 156.80 microns ตามลำดับ ค่ายุบตัวที่ได้นี้จะใช้

ในการทดสอบประสิทธิภาพในการคำนวณย้อนของโปรแกรมเกมเล็ท

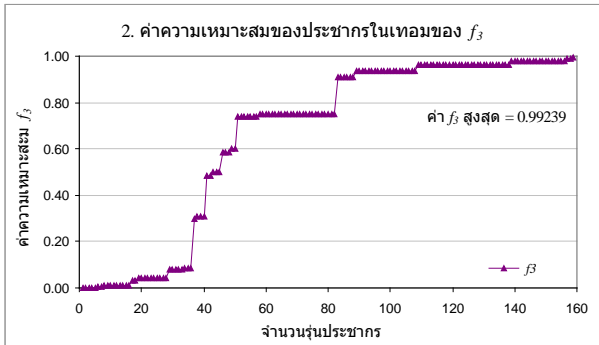
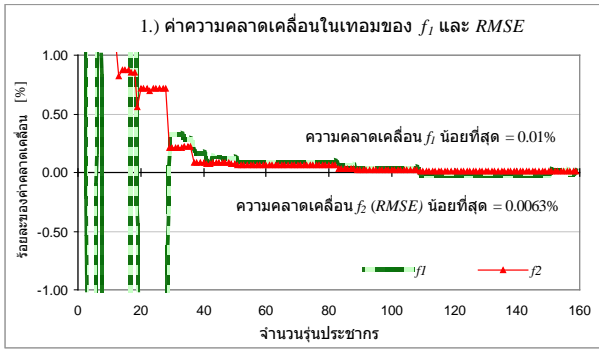
ดังที่ได้กล่าวแล้วว่ากระบวนการคำนวณย้อนในโปรแกรมเกมเล็ทต้องการเพียงช่วงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เป็นไปได้ของแต่ละชั้นทางเพื่อเริ่มต้นทำงาน ในการทดสอบครั้งนี้ผู้เขียนได้เลือกใช้ค่าความเป็นไปได้ของแต่ละชั้นทางดังในกรณีวิเคราะห์ดังนี้

- $\text{Min. } E_1 - \text{Max. } E_1 = 500 - 10,000 \text{ MPa}$
- $\text{Min. } E_2 - \text{Max. } E_2 = 10 - 500 \text{ MPa}$
- $\text{Min. } E_3 - \text{Max. } E_3 = 10 - 500 \text{ MPa}$
- $\text{Min. } E_4 - \text{Max. } E_4 = 10 - 300 \text{ MPa}$

เห็นได้จากการใช้เพียงช่วงค่าความเป็นไปได้ดังกล่าวจะทำให้การทำงานง่ายขึ้นกว่าการกำหนดชุดโมดูลัสเริ่มต้นเพียงชุดเดียวให้ใกล้เคียงค่าจริง แต่ในอีกด้านหนึ่งการใช้ช่วงค่าในลักษณะนี้ทำให้เกิดพื้นผิวดำตอบขนาดใหญ่ เช่นในตัวอย่างนี้ทำให้เกิดชุดคำตอบที่เป็นไปได้มากถึง 2.19×10^{12} ชุด จึงจำเป็นต้องใช้ระบบการค้นหาที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นในโปรแกรมเกมเล็ทในการค้นหาคำตอบที่ถูกต้อง ทั้งนี้แน่นอนว่าในทางปฏิบัติหากผู้ใช้มีข้อมูลด้านต่างๆของชั้นทางที่วิเคราะห์ เช่น แบบก่อสร้างเริ่มต้น ประวัติการซ่อมแซม ฯ เป็นข้อมูลประกอบมากขึ้นก็จะสามารถกำหนดช่วงค่าได้แคบลงซึ่งจะทำให้การทำงานของโปรแกรมเกมเล็ทมีความรวดเร็วและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สำหรับการเริ่มต้นการคำนวณย้อนกลับสามารถทำได้ทันทีหลังจากการกำหนดช่วงความเป็นไปได้ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ผู้พัฒนาโปรแกรมเกมเล็ทแนะนำ ($numpop = 210$, $maxgen = 200$, $pcross = 0.9$, $pjumpmu = 0$,

$pcreepmu = 0.4$, Niche method = on, Elitism = on) ซึ่งเป็นชุดค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทดสอบแล้วว่ามีความเหมาะสมกับงานคำนวณย้อนกลับโดยโปรแกรม จะทำการคำนวณจนกว่าจะพบโครงสร้างถนนลาดยางที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้ซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้ สำหรับการทดสอบในตัวอย่างนี้ให้ $f_1 = 0.01\%$ เป็นเงื่อนไขแสดงความสำเร็จของการรู้เข้า หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่ากำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุด在线นยบตัวของผิวทางต้องไม่เกิน 0.01% นั่นเองซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่มีความถูกต้องสูงมาก แต่หากยังไม่พบโปรแกรมจะทำการพัฒนาประชากรไปเรื่อยๆจนกว่าจะถึงประชากรรุ่นสุดท้ายที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดให้ยุติการคำนวณโดยอัตโนมัติ (ตัวอย่างกำหนดให้เท่ากับ 200 รุ่นประชากร) สำหรับผลการทดสอบครั้งนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าการค้นหาคำตอบของโปรแกรมได้พัฒนาประชากรจากรุ่นสู่รุ่นจนสิ้นสุดกระบวนการคำนวณ



รูปที่ 7 การลู่เข้าหาคำตอบของโปรแกรมแกมมาเล็ทจากแบบจำลองทางหลวงหมายเลข 3100 โดย 1) ค่าฟังก์ชัน f_1 และ f_2 2) ค่าฟังก์ชัน f_3

การลู่เข้าของคำตอบที่ได้จากโปรแกรมแกมมาเล็ทแสดงโดยค่าฟังก์ชัน f_1 และ f_2 ในภาพ 7-1 และค่าฟังก์ชัน f_3 ในภาพ 7-2 ซึ่งทั้ง 3 ค่าที่แสดงเป็นค่าที่คำนวณได้จากประชากรผู้นำหรือแบบจำลองโครงสร้างถนนที่ผลิตเส้นยวบตัวได้ใกล้เคียงเส้นยวบตัวจริงได้ดีที่สุดในแต่ละรุ่น ซึ่งข้อมูลของโครงสร้างนี้ได้ถูกบันทึกไว้และส่งต่อสู่รุ่นต่อไปโดย Elitism technique ที่ใช้ในแกมมาเล็ท จะเห็นได้ว่าในช่วงรุ่นแรกของประชากรค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงมาก (f_1 และ f_2 มาก f_3 น้อย) แต่เมื่อแบบจำลองถนนลาดยางที่ดีถูกคัดสรรให้ดำรงอยู่และถ่ายทอดโครโมโซมที่ดีสู่แบบจำลองซึ่งเป็นทายาทจากรุ่นสู่รุ่นทำให้ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ (ค่า f_1 และ f_2 ลดลง f_3 เพิ่มขึ้น) โดยโปรแกรมทำการคำนวณจนถึงประชากรรุ่นที่ 159 ก็สามารถพบโครงสร้าง

ถนนลาดยางที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดบนเส้นการยวบตัว (f_1) น้อยกว่า 0.01% ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการลู่เข้าที่กำหนดไว้ทำให้โปรแกรมหยุดการทำงาน โดยค่า f_2 (RMSE) และค่า f_3 สุดท้ายแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 0.0063% และ 0.9924 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้อยู่ทั่วไป เช่น โครงการ Long Term Pavement Performance (LTPP) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ค่า RMSE=3% เป็นค่าที่ยอมรับได้ [4] ทำให้สรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรมแกมมาเล็ทครั้งนี้ถือเป็นค่าที่มีความละเอียดถูกต้องสูงมาก นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้ค่า f_2 หรือ RMSE ในโปรแกรมแกมมาเล็ทยังทำให้การเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับการประเมินกำลังผิวทางบนมาตรฐานอื่นๆง่ายขึ้นอีกด้วย

ในขั้นตอนสุดท้ายโปรแกรมจะทำการแปลงรหัสสายโครโมโซมของโครงสร้างถนนลาดยางที่ดีที่สุดที่ค้นพบให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางและทำการรายงานผล ค่าโมดูลัสของแต่ละชั้นทางที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตั้งต้นกับค่าที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับ

ชั้นโครงสร้างถนนลาดยาง	ค่าตั้งต้น [MPa]	ค่าคำตอบ [MPa]	% Error
1. AC	3,000	3,000	0.0%
2. Base	291	291	0.0%
3. Subbase	155	155	0.0%
4. Subgrade	50	50	0.0%

ค่าในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรมแกมเล็ตในตัวอย่างนี้มีความถูกต้องสูงมาก โดยค่าความคลาดเคลื่อนของทั้ง 4 ชั้นทางเป็น 0.0% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าตั้งต้น สำหรับสาเหตุที่ค่าฟังก์ชัน f_1 , f_2 และ f_3 ที่พบในรูปที่ 7 ยังคงแสดงค่าความคลาดเคลื่อนให้เห็นเล็กน้อยนั้นสามารถประเมินได้ว่าอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการปัดเศษทศนิยม (Round-off error) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม แต่เมื่อรหัสโครโมโซมถูกแปลงค่ากลับเป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางเพื่อใช้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางแต่ละชั้นแล้วสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยดังกล่าวนั้นมีนัยสำคัญน้อยมาก

สรุปผลการวิจัย

เนื้อหาในบทความวิจัยนี้ได้อธิบายการบูรณาการนำเอาองค์ความรู้และเทคนิคใหม่ๆที่ทันสมัยของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้เพื่อจัดการกับความซับซ้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการคำนวณย้อนกลับหาค่าความแข็งแรงในสนามขณะรับน้ำหนักของถนนลาดยาง ซึ่งผลของการบูรณาการดังกล่าวถูกทำให้เป็นรูปธรรมและใช้งานได้จริง โดยผู้เขียนได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณย้อนกลับชื่อแกมเล็ต (GAMLET) ขึ้น โดยโครงสร้างถนนลาดยางจำนวนหนึ่งจะกลายเป็นกลุ่มประชากรที่ถูกสร้างขึ้นในแกมเล็ตโดยแปลงรหัสให้เป็นสายโครโมโซม จากการใช้วิธีการลอกเลียนระบบการคัดสรรของธรรมชาติและวิธีทางพันธุกรรมทำให้สามารถพัฒนาประชากรจากรุ่นสู่รุ่นให้ดีขึ้นได้ในลักษณะเช่นเดียวกันกับพัฒนาการ

ของสิ่งมีชีวิต ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมแกมเล็ตกับโปรแกรมคำนวณย้อนกลับอื่นๆที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง ได้แก่ โปรแกรม MICHBACK, MODULUS, EVERCALC, EVERCALC-AIt แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมแกมเล็ตมีศักยภาพที่ดีในเรื่องของมาตรฐานการค้นหาค่าคำตอบที่ถูกต้องน่าเชื่อถือ นอกจากนั้นจากตัวอย่างการประยุกต์ใช้โปรแกรมแกมเล็ตเพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยางที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลชั้นทางของทางหลวงหมายเลข 3100 ในจังหวัดปทุมธานีเป็นตัวอย่าง โดยลักษณะการทำงานและการพัฒนากลุ่มประชากรเพื่อค้นหาค่าตอบของโปรแกรมได้แสดงให้เห็นด้วยค่าฟังก์ชัน f_1 , f_2 และ f_3 ซึ่งสิ้นสุดการทำงานที่ประชากรรุ่นที่ 159 โดยค่า $f_1 < 0.01\%$ ตามที่กำหนดไว้ โดยค่า f_2 (RMSE) และค่า f_3 มีค่าเท่ากับ 0.0063% และ 0.99239 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางตั้งต้นกับค่าที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับในตัวอย่างนี้มีความคลาดเคลื่อน 0.0% ทุกชั้นทาง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการคำนวณค้นหาค่าตอบที่ดีเยี่ยมของโปรแกรมแกมเล็ต โดยศักยภาพในการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางที่ถูกต้องนี้ไม่เพียงแต่จะสามารถใช้ในการระบุกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างทางที่วัดในสนามได้ แต่ยังเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่จะทำให้สามารถขยายผลพัฒนาโปรแกรมแกมเล็ตกับงานคำนวณหาอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ (Remaining life) ของถนนลาดยางและงานคำนวณออกแบบการเสริมความแข็งแรงถนนลาดยางที่ถูกใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมของประเทศไทยต่อไปได้ ทั้งนี้เพื่อการออกแบบดังกล่าวมีความถูกต้องและคุ้มค่าทั้งจาก

มุมมองทางวิศวกรรมผิวทางและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

เนื้อหาในบทความวิจัยนี้ได้เคยถูกส่งเข้าร่วมประกวดบทความวิชาการของสมาคมทางหลวงแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณาให้บทความนี้ได้รับรางวัลบทความรองชนะเลิศ อันดับ 1 แต่เนื่องจากทางสมาคมฯ ผู้จัดประกวดไม่ได้มีนโยบายในการตีพิมพ์เผยแพร่บทความที่ได้รับรางวัลในวารสารวิชาการใด ผู้เขียนจึงนำบทความนี้มาตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารนี้เพื่อให้เกิดประโยชน์วงกว้างของงานวิชาการด้านวิศวกรรมการทางต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Department of Highway Thailand. 2001. Pavement Technology Project: Implementation of Falling Weight Deflectometer Technology and Development of Analytical Pavement Design in Thailand. Bangkok.
- [2] Hothan, J. 2004. Manuskript zur Vorlesung TV 26209: Fahrbahnbefestigung. Pavement Engineering Section, Leibniz University of Hannover, Hannover.
- [3] Thongindam, P. 2009. Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms, Doctoral Dissertaion, Leibniz University of Hannover, Hannover.
- [4] Alkasawneh, W. 2007. Backcalculation of Pavement Moduli Using Genetic Algorithms. Ph.D. Thesis, The University of Akron, Akron.
- [5] Fwa, T.F., Tan, C.Y. and Chan, W.T. 1997. Backcalculation Analysis of Pavement-Layer Moduli Using Genetic Algorithm. Transportation Research Record No. 1570. pp. 134-142, Washington, D.C.
- [6] Kameyama, S., Kasahara, A., Himeno, K. And Maruyama, T. 1998. Backcalculation of Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms. 8th International Conference on Asphalt Pavements. pp.1375-1385, Seattle, Washington.
- [7] Reddy, M.A., Murthy, M.S., Reddy, K.S. and Pandey, B.B. 2002. Backcalculation of pavement layer moduli using genetic algorithms. Journal of Highway Research Board 66, pp.1-10, Indian Roads Congress, New Delhi.
- [8] Tsai B.W., Kannekanti, V, N., and Harvey, J.T., 2004. Application of Genetic Algorithm in Asphalt Pavement Design. Transportation Research Record 1227. Washington, D.C., pp. 112-120.
- [9] Park, H.M., Park, S.W. and Hwang, J.J., 2006. Use of genetic algorithm and finite element method for backcalculating layer moduli in asphalt pavements. Transportation

- Research Record No. 07-2614, Washington, D.C.
- [10] Goldberg, D.E. and Deb, K., 1991. Comparative Analysis of Selection Schemes used in Genetic Algorithms. *Foundation of Genetic Algorithms*, pp.69-93
- [11] Syswerda, G. 1989. Uniform Crossover in Genetic Algorithms., 3rd International Conference on Genetic Algorithms. pp.2-9, Morgan Kaufmann.
- [12] Goldberg, D.E. and Richardson, J. 1987. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. *Genetic algorithms and their applications: 2nd International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 41-49.
- [13] Harichandran, R.S., Mahmood, T., Raab, A.R. and Baladi, G.Y. 1993. Modified Newton Algorithm for Backcalculation of Pavement Layer Properties. *Transportation Research Record 1384*, pp. 15-22, Washington, D.C.
- [14] สำนักสำรวจและออกแบบ, 2543. รายละเอียดโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 346 สายแยกทางหลวงหมายเลข 3100 – แยกทางหลวงหมายเลข 347 (ส่วนที่ 2B). กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม.
- [15] AASTHO.1993. AASTHO Guide for Design of Pavement Structure. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [16] Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn. 2001. Richtlinien fuer die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflaechen RstO'01. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Koeln.
- [17] De Jong, D. L.; Peutz, M.G.F., 1979. Korswagen, A.R., Computer Program BISAR Layered Systems under Normal and Tangential Surface Loads. Koninklijke / Shell-Laboratorium, Amsterdam.