การใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเพื่อปรับพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองในเกม

นายชาตา ซาลวาลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

USING MULTI-RESOLUTION COMPUTING FOR PARAMETERS ADJUSTMENT FOR EMERGENT ENVIRONMENTS IN GAMES

Mr. Chata Salwala

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเพื่อปรับพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองในเกม
โดย	นายชาตา ซาลวาลา
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ โคตรจรัส

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระ เหมืองสิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ โคตรจรัส)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐา ปานงาม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ เลิศสิทธิชัย)

ชาตา ซาลวาลา: การใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเพื่อปรับพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองในเกม. (USING MULTI-RESOLUTION COMPUTING FOR PARAMETERS ADJUSTMENT FOR EMERGENT ENVIRONMENTS IN GAMES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.วิษณุ โคตรจรัส, 155 หน้า.

สภาพแวดล้อมในเกมเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความสมจริงให้กับเกม โดยเฉพาะในเกมที่ผู้เล่นสามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมในเกมได้ แต่พฤติกรรมของสภาพแวดล้อมในเกมที่มีอยู่ในท้องตลาดนั้นถูกกำหนดไว้ตายตัว ซึ่งสามารถทำให้มีความสมจริงมากขึ้นได้โดยการนำสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองมาใช้ ซึ่งในด้านการพัฒนาเกมได้มีการพัฒนาโปรแกรมสำหรับกำหนดสมบัติของแผนที่แบบอัตโนมัติ เพื่อให้แผนที่ที่สร้างขึ้นมีพฤติกรรมตามที่ต้องการภายใต้สภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง แต่อย่างไรก็ตามโปรแกรมดังกล่าวมีข้อจำกัดทางด้านวิธีการคำนวณ จึงรองรับได้เพียงการทำงานกับแผนที่ที่มีขนาดเล็กกว่าแผนที่ที่มีการใช้งานจริงในเกมเท่านั้น ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงขยายโปรแกรมดังกล่าวให้สามารถรองรับการทำงานกับแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการคำนวณบนหน่วยประมวลผลภาพ เพื่อให้สามารถรองรับการทำงานกับแผนที่ที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของแผนที่ที่ใช้จริงในเกมมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการปรับปรุงแล้วแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเมื่อนำมาใช้สร้างแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงใช้เวลาในการทำงานลดลงเมื่อเทียบกับการทำการคำนวณด้วยวิธีเดิมซึ่งใช้หน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียว

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....
ปีการศึกษา 2555

5270271821: MAJOR COMPUTER ENGINEERING
KEYWORDS: CELLULAR AUTOMATA / GENETIC ALGORITHM / GPU COMPUTING / CUDA / MULTI-RESOLUTION COMPUTING

CHATA SALWALA: USING-MULTI-RESOLUTION COMPUTING FOR PARAMETERS ADJUSTMENT FOR EMERGENT ENVIRONMENTS IN GAMES. ADVISOR: ASST PROF. VISHNU KOTRAJARAS, Ph.D., 155 pp.

Environment in games is one of the crucial elements for enhancing games' realism, especially for games that allow players to interact with environments. So far, games on the market usually have pre-scripted environments. The use of emergent surroundings can improve environment behavior. In the field of game development, a tool for automatic map parameters adjustment was proposed. The tool was capable of adjusting map parameters so that emergent environments behaved according to users' requirements. However, the tool had calculation limitation that only allowed it to support maps smaller than standard game maps. The aim of this thesis is therefore to improve the tool so that it is able to support larger maps. Multi-resolution computation and GPU programming are applied so that the calculation supports maps closer to the size of standard game maps. Results from the improved tool indicated better quality output on larger maps and less time consumed compared to the existing approach which run its calculation on a single CPU.

Department: Computer Engineering Student's Signature.....
Field of Study: Computer Engineering Advisor's Signature.....
Academic Year: 2012

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ และคอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วิษณุ โคตรจรัส ซึ่งเป็นผู้ให้ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษา ตลอดจนช่วยตรวจทาน และแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง รวมถึงให้โอกาสและสิ่งที่ดีแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วีระ เหมืองสิน ผศ.ดร.เศรษฐา ปานงาม และผศ.ดร.สุรพงษ์ เลิศสิทธิชัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจจะสำเร็จได้หากไม่ได้รับความร่วมมือจากทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5
2.1.1 สภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง (Emergent Environment) 5
2.1.2 เซลลูลาร์ ออโตมาตา (Cellular Automata) 5
2.1.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms) 7
2.1.4 การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-resolution computation) 10
2.1.5 ไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน (Bilinear interpolation) 12
2.1.6 ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน (Bicubic interpolation) 15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
2.2.1 งานวิจัยด้านการออกแบบและใช้งานแผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง 17
2.2.2 งานวิจัยด้านการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในงานที่คล้ายกับงานวิจัยนี้ 34
บทที่ 3 การนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้เพื่อลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหา 37
3.1 การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ 37
3.2 การนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้งาน 41

หน้า

3.2.1 การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพสำหรับการจำลองสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง....42
3.2.2 การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพสำหรับการทำการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม....44
บทที่ 4 การปรับปรุงพัฒนาการทำงานของโปรแกรม....47
4.1 การปรับปรุงกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ของระบบ EmerGEnt....47
4.1.1 กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการถ่ายเทความร้อน....47
4.1.2 กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์....48
4.1.3 กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการไหลของน้ำ....49
4.2 การปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม....51
4.3 การใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....53
4.3.1 การปรับลดระดับความละเอียดด้านตำแหน่งและพื้นที่....54
4.3.2 การปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลา....56
4.3.3 การเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง....57
4.3.4 การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน....58
4.3.5 การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน....59
บทที่ 5 การทดสอบ ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล....61
5.1 การทดสอบการทำงาน....61
5.2 การทดสอบหาความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้นจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ....62
5.3 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยเดิมกับการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ....65
5.4 การทดสอบจำนวนรุ่นในการทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อนำผลที่ได้จากการค้นหามาทำการเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงและใช้ในการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น....66
5.5 การทดสอบเปรียบเทียบวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดแบบต่างๆ....69
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ....77
6.1 สรุปผลการวิจัย....77
6.2 ข้อเสนอแนะ....78
รายการอ้างอิง....82

หน้า

ภาคผนวก 84
ภาคผนวก ก วิธีการใช้งานโปรแกรมกำหนดสมบัติของพื้นที่ 85
ภาคผนวก ข แผนที่ที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดลองโดยละเอียด 97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 155

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1: ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์ของไฟและเหตุการณ์ของน้ำบนแผนที่ขนาด 8x8 เซลล์และ 32x32 เซลล์ โดยแสดงในรูปแบบ นาที : วินาที 25

ตารางที่ 2: ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาสำหรับเหตุการณ์ของไฟและเหตุการณ์ของน้ำบนแผนที่ขนาด 8x8 เซลล์และ 32x32 เซลล์ โดยแสดงในหน่วยร้อยละ (%) 25

ตารางที่ 3: ตารางแสดงประเภทของเหตุการณ์ ค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องและประเภทของหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บ 44

ตารางที่ 4: ตารางแสดงค่าการกำหนดลักษณะของพื้นที่ตามค่าลักษณะของพื้นที่ของยีน 52

ตารางที่ 5: ตารางแสดงค่าน้ำหนักสำหรับการสุ่มค่าลักษณะของพื้นที่ 53

ตารางที่ 6: วิธีการเลือกค่าเวลาให้กับเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ที่ระดับความละเอียดลดลง 56

ตารางที่ 7: ผลการทดสอบหาความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ 63

ตารางที่ 8: ระยะเวลาที่ใช้สำหรับขั้นตอนต่างๆ ของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ 63

ตารางที่ 9: ระยะเวลาที่ใช้สำหรับขั้นตอนต่างๆ ของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ 64

ตารางที่ 10: ผลการทดสอบเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยเดิมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่เสนอในงานวิจัยนี้ 65

ตารางที่ 11: ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงโดยใช้จำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน 66

ตารางที่ 12: ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางโดยใช้จำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน 67

ตารางที่ 13: ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาเป็นวินาทีโดยใช้จำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน 68

หน้า

ตารางที่ 14: ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้วิธีการเพิ่มระดับความละเอียดแบบต่าง ๆ ในการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....70
ตารางที่ 15: ผลการทดสอบเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาเป็นวินาทีจากการใช้วิธีการเพิ่มระดับความละเอียดแบบต่าง ๆ ในการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....70
ตารางที่ 16: ตารางเปรียบเทียบขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการทำงาน....74
ตารางที่ 17: ตารางแสดงหน่วยความจำที่ใช้สำหรับยีนและโครโมโซม....75
ตารางที่ 18: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์ของการลามของไฟที่ใช้ในการทดสอบความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ....97
ตารางที่ 19: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์การไหลของน้ำที่ใช้ในการทดสอบความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ....99
ตารางที่ 20: ตารางเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ....102
ตารางที่ 21: ตารางเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ....105
ตารางที่ 22: ตารางเปรียบเทียบร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ....107
ตารางที่ 23: ตารางเปรียบเทียบร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ....110
ตารางที่ 24: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์ของการลามของไฟที่ใช้ในการทดสอบการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....113
ตารางที่ 25: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์ของการไหลของน้ำที่ใช้ในการทดสอบการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....115
ตารางที่ 26: ผลการทดลองสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อทำการปรับแก้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยเดิม....118
ตารางที่ 27: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....121
ตารางที่ 28: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่จริงสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น....124

หน้า

ตารางที่ 29: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....127
ตารางที่ 30: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่จริงสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น....129
ตารางที่ 31: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....132
ตารางที่ 32: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น....135
ตารางที่ 33: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด....138
ตารางที่ 34: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น....140
ตารางที่ 35: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด (วินาที)....143
ตารางที่ 36: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น....146
ตารางที่ 37: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด (วินาที)....149
ตารางที่ 38: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น....151

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1: การเปลี่ยนสถานะของเซลลูลาร์ ออโตมาตาหนึ่งมิติ ในสิบห้าหน่วยเวลา โดยใช้กฎ "rule 30" ซึ่งกำหนดไว้ดังตารางส่วนบนของภาพ และมีสถานะเริ่มต้นดังตารางส่วนล่างในแถวบนสุด 6
ภาพที่ 2: รูปทรงทอรัส....7
ภาพที่ 3: ลำดับการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม 8
ภาพที่ 4: ตัวอย่างพีระมิดที่หลายระดับความละเอียด....10
ภาพที่ 5: ตัวอย่างการกำหนดจุดควบคุมให้กับรูปใบหน้าคน....11
ภาพที่ 6: ตัวอย่างการค้นหารูปใบหน้าคน....11
ภาพที่ 7: ตัวอย่างการหาค่าลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน....13
ภาพที่ 8: สมการสำหรับการทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน....13
ภาพที่ 9: ตัวอย่างการหาค่าไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน....14
ภาพที่ 10: ตัวอย่างสมการสำหรับการทำไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน 14
ภาพที่ 11: สมการพหุนามดีกรี 3 และสมการอนุพันธ์ 15
ภาพที่ 12: ค่าของตัวแปรต่างๆ ในรูปของค่าที่ตำแหน่ง x=0 และ x=1 และอนุพันธ์ของค่านั้นๆ 15
ภาพที่ 13: ตัวอย่างการหาค่าไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน....16
ภาพที่ 14: ระบบ EmerGEnT แสดงการเกิดไฟไหม้จากป่าบริเวณมุมล่างขวา ซึ่งถูกลมพัดไปทางเหนือ และถูกขวางโดยแม่น้ำ....17
ภาพที่ 15: ส่วนกำหนดจุดควบคุมเส้นทาง 20
ภาพที่ 16: ข้อมูลในโครโมโซมการลามของไฟ....21
ภาพที่ 17: ข้อมูลในโครโมโซมการไหลของน้ำ....21
ภาพที่ 18: ลำดับการวัดค่าความเหมาะสม 22
ภาพที่ 19: กฎการถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์....27
ภาพที่ 20: ตัวอย่างการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์แบบผิดพลาด....27
ภาพที่ 21: ตัวอย่างการหายไปของอุณหภูมิของเซลล์....28
ภาพที่ 22: ค่ามวลของแต่ละเซลล์ในแผนที่ตัวอย่าง 29
ภาพที่ 23: ภาพเหตุการณ์การลามของไฟหลังจากผ่านไป 6 หน่วยเวลา 30
ภาพที่ 24: กฎการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์....31
ภาพที่ 25: กฎการถ่ายเทน้ำระหว่างเซลล์ 32

หน้า

ภาพที่ 26: ตัวอย่างการไหลของน้ำจากตำแหน่งที่สูงกว่าไปยังตำแหน่งที่ต่ำกว่า.....33
ภาพที่ 27: ตัวอย่างการไหลของน้ำจากตำแหน่งที่ต่ำกว่าไปยังตำแหน่งที่สูงกว่า.....33
ภาพที่ 28: ลำดับโครงสร้างของเทรด.....38
ภาพที่ 29: ตัวอย่างการส่งบล็อคไปทำการประมวลผลบนสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์.....39
ภาพที่ 30: ลำดับโครงสร้างของหน่วยความจำบนหน่วยประมวลผลภาพ.....40
ภาพที่ 31: ตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมที่มีการใช้งานทั้งหน่วยประมวลผลกลางและหน่วยประมวลผลภาพ.....41
ภาพที่ 32: ตัวอย่างการกำหนดโครงสร้างของเทรดสำหรับแผนที่ขนาด 32x32 เซลล์.....42
ภาพที่ 33: ตัวอย่างการกำหนดโครงสร้างของเทรดสำหรับการคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับแผนที่ขนาด 32x32 เซลล์.....45
ภาพที่ 34: กฎการถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์แบบใหม่.....48
ภาพที่ 35: กฎการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์แบบใหม่.....49
ภาพที่ 36: กฎการคำนวณการไหลของน้ำของเซลล์แบบใหม่.....50
ภาพที่ 37: ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยนที่ทำให้เกิดปัญหา.....52
ภาพที่ 38: การจัดกลุ่มเซลล์เพื่อทำการลดระดับความละเอียดสำหรับแผนที่ขนาด 32x32 เซลล์.....55
ภาพที่ 39: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่โดยตรง.....57
ภาพที่ 40: ตัวการอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน.....58
ภาพที่ 41: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันบริเวณมุม.....59
ภาพที่ 42: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน.....59
ภาพที่ 43: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันบริเวณมุม.....60
ภาพที่ 44: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของค่ามวลใน 1 มิติ.....71
ภาพที่ 45: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของค่าความสูงใน 1 มิติ.....72
ภาพที่ 46: ตัวอย่างสถานการณ์แสดงข้อจำกัดของกฎการไหลของน้ำ.....80
ภาพที่ 47: ส่วนต่างๆของเครื่องมือกำหนดสมบัติของพื้นที่.....85
ภาพที่ 48: เลือกหัวข้อ “Set Path”.....86
ภาพที่ 49: เลือกสร้างเส้นทางการลามของไฟ.....86
ภาพที่ 50: การสร้างจุดควบคุมเส้นทาง.....87

หน้า

ภาพที่ 51: กำหนดขนาดรัศมี และเวลาของจุดควบคุมเส้นทาง....87
ภาพที่ 52: การสร้างจุดควบคุมเส้นทางเพิ่มเติม หรือปิดเส้นทาง....88
ภาพที่ 53: ย้ายตำแหน่งจุดควบคุมเส้นทาง....88
ภาพที่ 54: แก้ไขเวลาที่เกิดเหตุการณ์....89
ภาพที่ 55: ลบจุดควบคุมเส้นทาง....89
ภาพที่ 56: เส้นทางที่กำหนดเป็นไปไม่ได้....90
ภาพที่ 57: เลือกหัวข้อ “Run Map”....90
ภาพที่ 58: หยุดการทำงานของส่วนกำหนดสมบัติของพื้นที่....91
ภาพที่ 59: ดูเหตุการณ์ที่ออกแบบ....91
ภาพที่ 60: หยุดเหตุการณ์....92
ภาพที่ 61: เวลาของเหตุการณ์....92
ภาพที่ 62: แสดงอุณหภูมิของเซลล์....93
ภาพที่ 63: เลือกเซลล์ที่ต้องการแก้ไข....93
ภาพที่ 64: แก้ไขค่าของสมบัติ....94
ภาพที่ 65: สุ่มสมบัติของเซลล์....94
ภาพที่ 66: เลือกทิศทางลม....95
ภาพที่ 67: สร้างแผนที่ใหม่....95
ภาพที่ 68: หน้าต่างการเปิดไฟล์....96
ภาพที่ 69: ปิดการแสดง เส้นตาราง เส้นทาง และจุดกำเนิด....96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สภาพแวดล้อมในเกมเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความสมจริงให้กับเกม โดยเฉพาะในเกมที่ผู้เล่นสามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมในเกมได้ เช่น เกม Command & Conquer: Generals (2003) – ผู้เล่นสามารถใช้เครื่องบินก่อไฟบนแผนที่ได้ซึ่งจะทำให้ศัตรูที่เดินผ่านได้รับบาดเจ็บ แต่ในเกมที่กล่าวมานั้น พฤติกรรม (Behavior) ของสภาพแวดล้อมถูกกำหนดไว้ตายตัว (Scripting) ซึ่งสามารถทำให้สมจริงมากขึ้น [1] ได้โดยเปลี่ยนมาใช้สภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง (Emergent Environment) ซึ่งแสดงพฤติกรรมโดยขึ้นกับสมบัติ (Property) ของพื้นที่ และกฎที่กำหนดไว้ (Rule)

ในด้านการพัฒนาเกม ได้มีการพัฒนาโปรแกรมสำหรับกำหนดสมบัติของแผนที่แบบอัตโนมัติ [2] เพื่อให้แผนที่ที่สร้างขึ้นมีพฤติกรรมตามที่ต้องการภายใต้สภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเข้ามาช่วย เพื่อลดเวลาและกำลังคนที่ต้องใช้ในการพัฒนาเกมลง โปรแกรมนี้ทำงานโดยรับเหตุการณ์เป้าหมายจากผู้ใช้แล้วทำการค้นหาโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อกำหนดคุณสมบัติของแผนที่ ร่วมกับการใช้วิธีการปีนเขาชันสุดเป็นระยะๆ อย่างไรก็ตาม โปรแกรมนี้รองรับการทำงานกับแผนที่ขนาดกว้างแปดเซลล์ ยาวแปดเซลล์เท่านั้น ในขณะที่แผนที่ที่ใช้จริงในเกมจะมีความละเอียดสูงกว่านี้ เช่น ในเกม Warcraft 3: The Frozen Throne (2003) และ Starcraft 2 (2010) แผนที่ที่มีความละเอียดน้อยที่สุดมีขนาดกว้างสามสิบสองเซลล์ ยาวสามสิบสองเซลล์ นอกจากนั้น ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาของโปรแกรมยังเพิ่มขึ้นตามขนาดของแผนที่ ทำให้หากต้องการนำโปรแกรมนี้ไปใช้งานกับแผนที่ที่มีความละเอียดสูงขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

ดังนั้น วิทยานิพนธ์ชิ้นนี้จะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงขยายการทำงานจากโปรแกรมเดิม ให้สามารถรองรับการทำงานกับแผนที่ที่มีความละเอียดสูงขึ้นได้ เพื่อให้มีความละเอียดใกล้เคียงกับขนาดของแผนที่ที่ใช้จริงในเกมมากยิ่งขึ้น รวมทั้งลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานลง เพื่อให้อยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยจะใช้การคำนวณบนหน่วยประมวลผลภาพและการประมวลผลแบบหลายระดับความละเอียด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาขยายผลจากโปรแกรมต้นแบบเดิมที่สามารถสร้างเหตุการณ์ในเกมที่ใช้แผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองได้โดยไม่ต้องทำการแก้ไขสมบัติของสิ่งแวดล้อมเอง ให้สามารถรองรับการทำงานกับแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยให้ผลที่ดีขึ้นกว่าการทำงานด้วยโปรแกรมเดิม เมื่อใช้ระยะเวลาและหน่วยความจำในการทำงานเท่ากับที่โปรแกรมเดิมต้องใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. โปรแกรมในงานวิจัยนี้ปรับแต่งค่าได้เฉพาะแผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองตามระบบ EmerGEnT เท่านั้น และมีข้อกำหนดเพิ่มเติมบางอย่างกล่าวคือ
   - มีเหตุการณ์ 2 อย่าง คือ การลามของไฟ และการไหลของน้ำ
   - เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่อิงกับกฎตามธรรมชาติ
   - มีค่าสมบัติที่โปรแกรมจะทำการปรับค่าหกค่า โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่
     - สมบัติของเซลล์ที่มีผลต่อการไหลของน้ำ ได้แก่ ความสูง
     - สมบัติของเซลล์ที่มีผลต่อการลามของไฟ ได้แก่ ลักษณะของพื้นที่, อุณหภูมิ, มวลของเชื้อเพลิง, ความเสียหายของเชื้อเพลิงจากการลุกไหม้ และความชื้น
   - มีพื้นที่สามแบบ คือ หญ้า, ป่า และน้ำ
   - แต่ละเซลล์บนแผนที่สามารถเกิดเหตุการณ์ได้หลายอย่าง แต่เหตุการณ์แต่ละอย่างจะเกิดขึ้นได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น เช่น เซลล์ที่ไฟไหม้จนมอดแล้วจะไม่สามารถกลับมาไหม้อีกครั้งได้
   - การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด จะแบ่งระดับความละเอียดเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ระดับความละเอียดที่เท่ากับความละเอียดของแผนที่ และระดับความละเอียดที่มีความละเอียดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความละเอียดของแผนที่
2. ผู้ใช้จะกำหนดเหตุการณ์บนแผนที่ ได้ด้วยเส้นทางการเกิดเหตุการณ์ กับเวลาในการเกิดเหตุการณ์เท่านั้น โดยเวลาในการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ จะถูกจำกัดไว้เพื่อให้เหตุการณ์ที่กำหนดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้จริง
3. การทดสอบผลกำหนดไว้ดังนี้

- ทดสอบโดยการสุ่มสร้างเหตุการณ์บนแผนที่จำนวน 100 แบบ โดยแบ่งเป็นเหตุการณ์การลามของไฟ 50 แบบ และเหตุการณ์การไหลของน้ำ 50 แบบ
- ทดสอบด้วยแผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์
- ทำการทดสอบโดยใช้จำนวนประชากรขนาด 1000 หน่วยทั้งในการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งและในการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น
- การค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นเพียงอย่างเดียวจะทำการทดสอบโดยใช้จำนวนรุ่นของประชากร 100, 120, 140, 160, 180, 200 รุ่น
- การค้นหาแบบหลายระดับความละเอียดจะทำการทดสอบโดยใช้จำนวนรุ่นของประชากรในการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่ง 20, 40, 60, 80 และ 100 รุ่น แล้วจึงนำผลที่ได้มาทำการค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้นเป็นจำนวน 100 รุ่น
- เหตุการณ์ที่สุ่มทดสอบ ได้แก่ การลามของไฟ และการไหลของน้ำ
- เหตุการณ์ที่สุ่มทดสอบจะต้องเป็นเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้จริง
- มีจุดควบคุมเส้นทางในทุกเหตุการณ์ตั้งแต่ 2 ถึง 5 จุด
    - สุ่มตำแหน่งทั่วทั้งแผนที่
    - สุ่มขนาดรัศมีตั้งแต่ 1 ถึง 2 หน่วย
    - สุ่มเวลาเกิดไม่เกิน 50 หน่วยเวลา

4. ไม่มีลมและผลกระทบที่เกิดจากลมต่อเหตุการณ์ต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง
5. ผลการทำงานที่ควรจะเป็นกำหนดไว้ดังนี้
    - ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง ต่อเหตุการณ์ที่โปรแกรมกำหนดให้เกิดจากเส้นทางที่ผู้ใช้ลากในพื้นที่ และเวลา ณ จุดควบคุมเส้นทาง จะต้องมีค่าเฉลี่ยในทุกจุด จากทุกการทดสอบมากกว่าร้อยละ 65 ในแผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์
    - ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทาง ต่อพื้นที่ที่เป็นเส้นทางของเหตุการณ์ รวมทุกเหตุการณ์ จะต้องมีค่าเฉลี่ยในทุกการทดสอบน้อยกว่าร้อยละ 30

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้โปรแกรมพัฒนาเกมที่ใช้แผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองที่รองรับแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในเกม โดยให้ผลความถูกต้องอย่าง

น้อยร้อยละ 65 และใช้เวลาในการทำงานในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับขนาดของแผนที่ คือ ไม่เกิน 25 นาทีสำหรับแผนที่ขนาดกว้างสามสิบสองเซลล์ ยาวสามสิบสองเซลล์

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบ และพัฒนาขยายผลการทำงานของโปรแกรมกำหนดสมบัติของพื้นที่บนแผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองแบบอัตโนมัติ
3. ทดสอบการทำงานของโปรแกรม
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง
5. สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

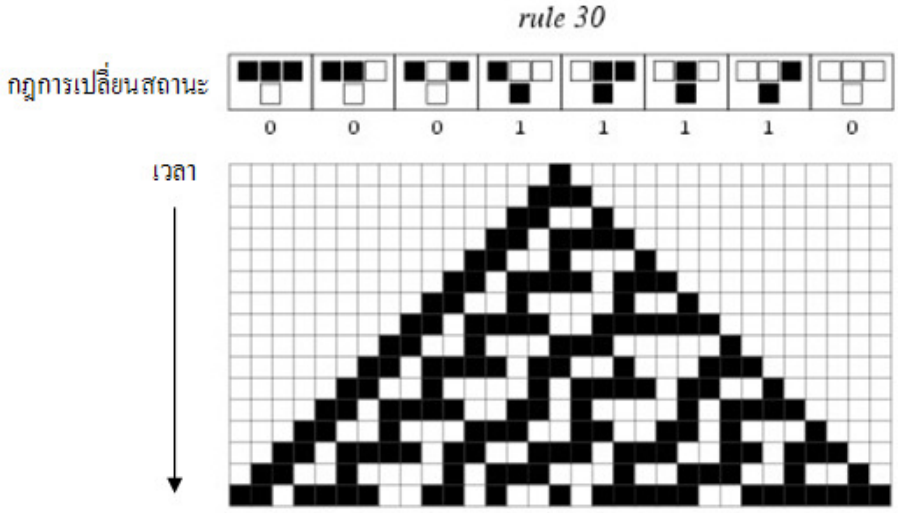
2.1.1 สภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง (Emergent Environment) [1]

สภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองเป็นการสร้างสภาพแวดล้อมโดยใช้เพียงการกำหนดสมบัติขององค์ประกอบในสภาพแวดล้อมและกฎในการแสดงพฤติกรรม แล้วปล่อยให้เหตุการณ์ต่างๆ ดำเนินไปเองภายใต้กฎที่วางไว้ เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติที่ถูกควบคุมโดยกฎฟิสิกส์ โดยส่วนของแผนที่ที่ทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง (Emergent Environment Map) สามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้เซลลูลาร์ ออโตมาตา (Cellular Automata) โดยนำกฎฟิสิกส์ที่ใช้ควบคุมสภาพแวดล้อมมาใช้เป็นกฎในการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ และเนื่องจากการทำงานของเซลลูลาร์ ออโตมาตา แต่ละเซลล์จะมีการเปลี่ยนสถานะโดยขึ้นกับสถานะของเซลล์รอบข้าง ทำให้เมื่อมีเหตุการณ์หรือพฤติกรรมบางอย่างเกิดขึ้นบนแผนที่ เซลล์รอบข้างก็อาจได้รับผลกระทบและมีการแพร่กระจายออกไป ทำให้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นดูมีความสมจริงมากขึ้น

2.1.2 เซลลูลาร์ ออโตมาตา (Cellular Automata) [3]

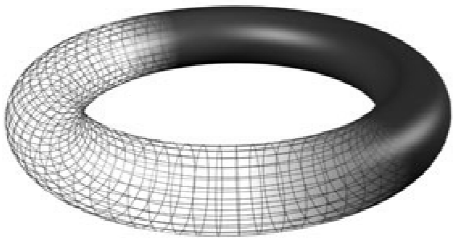
เซลลูลาร์ ออโตมาตาเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Model) ที่ประกอบด้วยกลุ่มของเซลล์ที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งแต่ละเซลล์มีสถานะ (state) ได้จำกัดและการจัดเรียงตัวของเซลล์สามารถจัดเรียงได้ในหลายมิติ แต่ละเซลล์จะมีกลุ่มของเซลล์ที่เรียกว่าเซลล์เพื่อนบ้าน (neigborhood) ซึ่งอาจนับรวมตัวเองอยู่ในกลุ่มนี้ด้วยก็ได้ หน่วยเวลาที่ใช้สำหรับเซลลูลาร์ออโตมาตาเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง การเปลี่ยนสถานะของเซลล์ในแต่ละหน่วยเวลาจะขึ้นกับกฎในการเปลี่ยนสถานะซึ่งจะอิงกับข้อมูลของเซลล์ในกลุ่มเซลล์เพื่อนบ้านในสถานะ ณ เวลาก่อนหน้า โดยจะใช้กฎเดียวกันสำหรับทุกเซลล์ในเซลลูลาร์ ออโตมาตาเดียวกัน กฎในการเปลี่ยนสถานะของเซลล์อาจเป็นได้ทั้งฟังก์ชันที่ให้ผลแน่นอน (Deterministic Functions) หรือ ฟังก์ชันของความน่าจะเป็น (Probabilistic Functions) ก็ได้ ตัวอย่างของเซลลูลาร์ ออโตมาตาแบบสองมิติที่มีชื่อเสียงคือ เกมชีวิตของคอนเวย์ (Conway's game of life) ซึ่งถูกค้นพบโดย J. H. Conway ในปีค.ศ. 1970 โดยมีสถานะของเซลล์ที่เป็นไปได้อยู่สองสถานะ หรืออีกตัวอย่างที่ใช้คือกฎ “rule 30” ซึ่งใช้กับการเปลี่ยนสถานะของเซลลูลาร์ ออโตมาตาแบบหนึ่งมิติ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยในส่วนบนของรูปคือกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ซึ่งมีทั้งหมด 8 รูปแบบ โดยในแถวบนของกฎแสดงถึงสถานะของเซลล์ที่สนใจและเซลล์

ข้างเคียงในเวลาปัจจุบัน และแถวล่างแสดงถึงสถานะของเซลล์ที่สนใจในเวลาถัดไป และในส่วนล่างของรูปซึ่งมีลักษณะเป็นตารางนั้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของเซลลูลาร์ ออโตมาตาหนึ่งมิติที่ใช้กฎ “rule 30” โดยมีสถานะเริ่มแรกดังแถวบนสุดของตาราง และมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละขั้นเวลาไล่ลำดับลงไปในแถวที่อยู่ถัดลงไปด้านล่างหนึ่งแถว เป็นจำนวนขั้นเวลารวมทั้งหมดสิบห้าหน่วยเวลา



ภาพที่ 1: การเปลี่ยนสถานะของเซลลูลาร์ ออโตมาตาหนึ่งมิติ ในสิบห้าหน่วยเวลา โดยใช้กฎ "rule 30" ซึ่งกำหนดไว้ดังตารางส่วนบนของภาพ และมีสถานะเริ่มต้นดังตารางส่วนล่างในแถวบนสุด [3]

อย่างไรก็ตาม การใช้งานในงานวิจัยนี้จะใช้เซลลูลาร์ ออโตมาตาที่มีแบบรูปตารางรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดจำกัด ซึ่งจะเกิดปัญหาในการคำนวณสำหรับเซลล์ที่อยู่บริเวณขอบ แนวทางแก้ไขมีอยู่สองแนวทาง ได้แก่ การกำหนดให้เซลล์ที่ขอบของเซลลูลาร์ ออโตมาตาขนาดจำกัดมีสถานะคงที่เสมอ หรือการกำหนดให้เซลล์ข้างเคียงของเซลล์ที่ขอบเป็นเซลล์ที่อยู่อีกฝั่งหนึ่งของเซลลูลาร์ ออโตมาตาแทน ซึ่งในกรณีของเซลลูลาร์ ออโตมาตาสองมิติ ขอบด้านซ้ายและขอบด้านขวาของเซลลูลาร์ ออโตมาตาจะต่อเนื่องถึงกัน และขอบด้านบนและขอบด้านล่างของเซลลูลาร์ ออโตมาตาจะต่อเนื่องถึงกัน ทำให้เซลล์เรียงต่อกันเป็นพื้นผิวของรูปทรงทอรัส (Torus) ดังในภาพที่ 2 ทำให้เหมือนกับว่าเซลลูลาร์ ออโตมาตามีขนาดไม่จำกัด โดยการใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีกำหนดให้เซลล์ที่ขอบนอกมีสถานะคงที่ เนื่องจากพื้นที่ที่อยู่ด้านตรงข้ามกันจะไม่มีเหตุการณ์ที่ต่อเนื่องถึงกัน



ภาพที่ 2: รูปทรงทอรัส [4]

นอกจากนี้ในการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง ค่าสมบัติของเซลล์ (Property) ซึ่งเป็นสถานะของเซลล์ส่วนที่ไม่มีการแสดงผลต้องถูกเพิ่มเข้าไป และต้องกำหนดให้ทั้งสถานะ และสมบัติสามารถมีค่าแบบต่อเนื่องได้

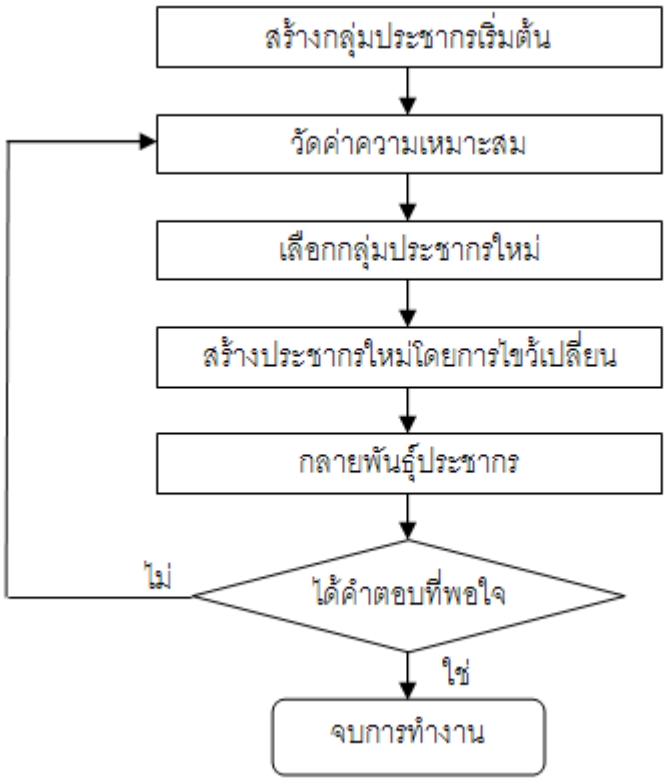
2.1.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms) [5]

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกเสนอโดย Holland เป็นปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ประเภทหนึ่งซึ่งใช้ค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุด โดยมีกระบวนการทำงานที่เลียนแบบมาจากกระบวนการวิวัฒนาการ และการคัดเลือกตามธรรมชาติ กล่าวคือสิ่งมีชีวิตที่สามารถปรับตัวให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมได้ดีจะสามารถอยู่รอด และถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่ดีนั้นไปสู่ลูกได้

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีลำดับการทำงานดังนี้

1. สร้างกลุ่มประชากร (Population) เริ่มต้น
2. วัดค่าความเหมาะสม (Fitness) ของประชากรแต่ละตัว ด้วยฟังก์ชันค่าความเหมาะสม(Fitness Function)
3. สร้างกลุ่มประชากรใหม่ สำหรับรุ่น (Generation) ถัดไปโดยสร้างขึ้นจาก
   3.1. เลือกประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงมาโดยตรง
   3.2. สร้างประชากรใหม่ ขึ้นมาทดแทนประชากรที่ไม่เหมาะสม จากการไขว้เปลี่ยน (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) โดยใช้ประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงเป็นต้นแบบ
4. กลับไปทำงานในขั้นตอนที่สองสำหรับกลุ่มประชากรรุ่นถัดไป จนกว่าจะได้ประชากรที่มีค่าความเหมาะสมตามที่ต้องการ

ซึ่งลำดับการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังในภาพที่ 3



ภาพที่ 3: ลำดับการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

สำหรับส่วนประกอบของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ประกอบด้วย

- กลุ่มประชากร คือกลุ่มของโครโมโซม (Chromosome) ที่เป็นคำตอบของปัญหาชุดเดียวกัน โดยกลุ่มประชากรเริ่มต้นจะสร้างโดยการสุ่มค่าของโครโมโซมแต่ละตัวขึ้นมา
- โครโมโซม คือแถวของคำตอบชุดหนึ่งสำหรับปัญหาที่สนใจ โดยรูปแบบคำตอบอาจจะเป็นได้ทั้ง จำนวนเต็ม (Integer), ค่าจริง (Real) หรือ ใช้การเข้ารหัสเป็นเลขฐานสอง (Binary)
- ค่าความเหมาะสม คือค่าที่แสดงความเหมาะสมของโครโมโซมต่อปัญหาที่สนใจ
- ฟังก์ชันค่าความเหมาะสม คือฟังก์ชันที่ให้คำตอบเป็นค่าความเหมาะสม โดยฟังก์ชันที่ถูกใช้จะแตกต่างกันไปตามปัญหาที่สนใจ และคำตอบที่ต้องการ เช่น ในงานวิจัยนี้ต้องการควบคุมการเกิดเหตุการณ์ในเซลล์บนแผนที่ ดังนั้นฟังก์ชันค่าความเหมาะสมจึงควรคำนวณจาก การเกิด หรือไม่เกิดเหตุการณ์ในแต่ละเซลล์ ว่าตรงกับที่ต้องการหรือไม่
- การเลือกประชากรเพื่อสร้างกลุ่มประชากรใหม่ สามารถทำได้หลายวิธีเช่น

- เรียงประชากรตามค่าความเหมาะสม แล้วจึงเลือกประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงตามจำนวนที่ต้องการ
- เลือกประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Threshold) มักจะใช้ในกรณีที่กลุ่มประชากรมีขนาดใหญ่ ซึ่งการเรียงค่าจะเสียเวลานาน

- การไขว้เปลี่ยน คือการสร้างโครโมโซมใหม่สองตัวด้วยการสลับค่าบางค่าระหว่างโครโมโซมต้นแบบสองตัวที่เลือกมาอย่างสุ่ม เพื่อให้โครโมโซมใหม่แต่ละตัวได้รับข้อดีจากโครโมโซมต้นแบบทั้งสองตัว การไขว้เปลี่ยนมีหลายวิธีดังนี้
  - สุ่มเลือกจุดไขว้เปลี่ยนจำนวนหนึ่ง โดยมากจะใช้ หนึ่ง หรือสองจุด โดยค่าในช่วงของจุดไขว้เปลี่ยนแต่ละจุด เมื่อสลับค่าจะไปปรากฏที่โครโมโซมใหม่ตัวเดียวกัน
  - สุ่มว่าค่าในโครโมโซมต้นแบบแต่ละตัวจะไปปรากฏที่โครโมโซมใหม่ตัวใด เปรียบเสมือนมีจุดไขว้เปลี่ยนที่ทุกๆ ตำแหน่งของยีนเป็นความยาวเท่ากับความยาวของโครโมโซม วิธีนี้เรียกว่าการไขว้เปลี่ยนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Crossover)
  - ใช้โครโมโซมต้นแบบมากกว่าสองตัว
- ในกรณีที่ค่าในโครโมโซมเป็นข้อมูลที่เข้ารหัสเป็นเลขฐานสอง การไขว้เปลี่ยนจะทำให้ข้อมูลที่มีจุดไขว้เปลี่ยนอยู่มีการเปลี่ยนแปลงด้วย แต่ในกรณีที่ข้อมูลเป็นจำนวนเต็ม หรือค่าจริง จะเกิดเพียงการจัดเรียงข้อมูลใหม่ การเปลี่ยนแปลงค่าที่แท้จริงของข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับการกลายพันธุ์เพียงอย่างเดียว จึงอาจจะใช้การรวมค่า (Blending) ที่จุดไขว้เปลี่ยน ซึ่งทำได้หลายวิธีดังนี้
  - รวมค่าระหว่างค่าของโครโมโซมต้นแบบ ด้วยอัตราส่วนอย่างสุ่ม จะได้ผลลัพธ์เพียงค่าเดียว ดังสมการ (1) โดยให้ β เป็นค่าสุ่มในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1

    $$p_{new} = \beta p_1 + (1-\beta) p_2 \quad (1)$$

  - บวก/ลบค่าในโครโมโซมต้นแบบ ด้วยอัตราส่วนอย่างสุ่มของผลต่างของค่าทั้งสอง ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์สองค่า

    $$p_{new1} = p_1 - \beta(p_1 - p_2) \quad (2)$$

    $$p_{new2} = p_2 + \beta(p_1 - p_2) \quad (3)$$

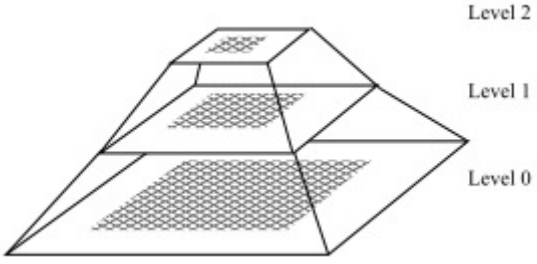
  - ทำการรวมค่าโดยอัตราส่วนสามารถมีค่าเกินกว่าช่วง 0 ถึง 1 ได้ เพื่อให้ค่าใหม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปนอกเหนือขอบเขตของค่าในโครโมโซมต้นแบบได้

- การเลือกประชากรเพื่อทำการไขว้เปลี่ยน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น
    - สุ่มเลือกประชากรแบบสม่ำเสมอ
    - สุ่มประชากรโดยถ่วงน้ำหนักประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูงให้มีโอกาสถูกเลือกมากกว่า
    - เลือกจากประชากรที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากรย่อยที่สุ่มขึ้นมา
- การกลายพันธุ์ คือการสร้างโครโมโซมใหม่ด้วยการสุ่มเปลี่ยนค่าบางค่าในโครโมโซมต้นแบบเพื่อให้โครโมโซมใหม่มีลักษณะที่ไม่ปรากฏในรุ่นก่อน วิธีที่ทำได้คือ
    - ใช้อัตราการกลายพันธุ์คงที่
    - อัตราการกลายพันธุ์เพิ่ม หรือลดตามจำนวนรุ่นที่ผ่านไป
    - สุ่มค่าแบบสม่ำเสมอ
    - สุ่มค่าโดยใช้การแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีข้อดีคือ เกิดการค้นหาคำตอบในทุกบริเวณของคำตอบที่เป็นไปได้ ทำให้ไม่ติดอยู่กับค่าต่ำสุด/สูงสุดเฉพาะที่ (Local Minimum/Maximum) ซึ่งเหมาะสมกับปัญหาที่มีความซับซ้อน สามารถมีคำตอบที่เหมาะสมได้หลายค่า เช่นปัญหาที่เป็นที่สนใจในงานวิจัยนี้

2.1.4 การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-resolution computation)

การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่มีองค์ประกอบที่สำคัญของปัญหาในเชิงมิติและ/หรือเวลาในหลายขนาด โดยวิธีการหนึ่งที่ใช้คือการสร้างพีระมิด (Pyramid) ของข้อมูลขึ้นมาดังในภาพที่ 4 โดยมีฐานของพีระมิดคือชุดข้อมูลเริ่มต้น และในแต่ละชั้นที่สูงขึ้นจากฐานของพีระมิดจะมีระดับความละเอียดที่ลดลง โดยนำค่าเฉลี่ยของบริเวณโดยรอบของแต่ละจุดในชั้นที่ถัดลงไปหนึ่งชั้นมาใช้



ภาพที่ 4: ตัวอย่างพีระมิดที่หลายระดับความละเอียด [6]

การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดถูกใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น การประมวลผลภาพ (Image Processing) เช่น ในการใช้งานร่วมกับแอคทีฟเชปโมเดล (Active Shape Model) [6] ซึ่งใช้ในการค้นหาจุดเด่น (Feature) บนภาพที่มีรูปแบบเดียวกับของชุดข้อมูลอ้างอิงที่ได้ทำการฝึกสอนไว้ให้กับระบบ ซึ่งมีการทำงานโดยเริ่มจากการเก็บชุดข้อมูลตัวอย่างโดยกำหนดจุดควบคุม (Control Point) ให้กับจุดเด่น (Feature) ต่างๆ ของชุดภาพตัวอย่างดังในภาพที่ 5 แล้วทำการเก็บข้อมูลค่าสีโดยรอบของแต่ละจุดควบคุม เมื่อได้ชุดข้อมูลตัวอย่างเป็นจำนวนเพียงพอแล้วจึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาหาค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเพื่อนำไปใช้ในการค้นหาต่อไปดังตัวอย่างในภาพที่ 6 โดยโครงสร้างของจุดควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงหนึ่ง

ภาพที่ 5: ตัวอย่างการกำหนดจุดควบคุมให้กับรูปใบหน้าคน [6]

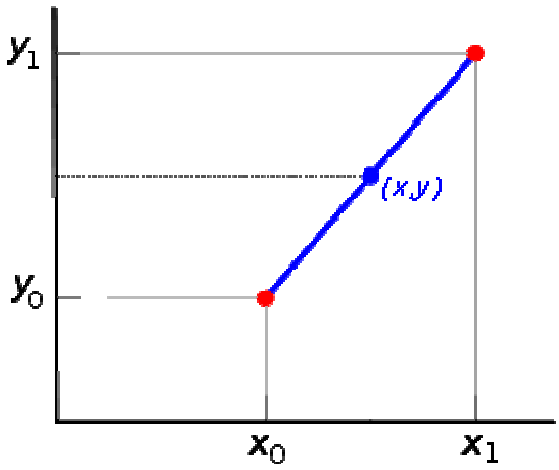
ภาพที่ 6: ตัวอย่างการค้นหารูปใบหน้าคน [6]

เนื่องจากการค้นหาโดยใช้แอคทีฟเซปโมเดลนั้นมีลักษณะเป็นการค้นหาเฉพาะที่ ทำให้ตำแหน่งเริ่มต้นในการวางจุดควบคุมมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการค้นหาเป็นอย่างมาก ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเริ่มต้นอาจส่งผลให้ติดกับค่าสูงสุดเฉพาะที่ได้ จึงมีการนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเข้ามาร่วม โดยเริ่มทำการค้นหาจากภาพที่มีระดับความละเอียดต่ำที่สุดหรือที่ Level 2 ในภาพที่ 4 จนผลที่ได้มีการลู่เข้าจนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานในรอบก่อนหน้าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ก็จะทำการค้นหาจากภาพที่มีระดับความละเอียดสูงขึ้นหนึ่งระดับ เช่นในกรณีนี้ก็จะเริ่มทำการค้นหาจากภาพที่ระดับความละเอียดที่ Level 1 ในภาพที่ 4 โดยทำกระบวนการนี้ซ้ำไปจนสิ้นสุดการทำงานที่ภาพที่มีระดับความละเอียดสูงสุดซึ่งในกรณีนี้คือที่ Level 0 ซึ่งก็คือฐานของพีระมิดนั่นเอง การค้นหาที่ทำด้วยวิธีนี้ได้ผลการทำงานที่ดีขึ้นรวมถึงใช้เวลาในการทำงานน้อยลงอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ จะทำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดในแบบที่แตกต่างออกไป โดยวิธีการสร้างพีระมิดโดยทั่วไปเป็นการสร้างจากฐานขึ้นไปสู่ยอด โดยสร้างขึ้นจากการใช้ค่าเฉลี่ยของบริเวณโดยรอบของแต่ละจุดในชั้นที่มีระดับความละเอียดสูงกว่าที่อยู่ถัดลงไปหนึ่งชั้น แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างพีระมิดในทิศทางกลับกันคือสร้างจากชั้นบนสุดลงมายังชั้นล่างสุดแทนโดยทำการเพิ่มความละเอียดให้กับข้อมูลด้วยวิธีการประมาณค่าแบบต่างๆ โดยทำการค้นหาบนแผนที่ที่ระดับความละเอียดต่ำที่สุดก่อนเพื่อกำหนดค่าที่ระดับนั้น หลังจากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้นี้มาทำการขยายเพิ่มระดับความละเอียดขึ้นทีละระดับจนได้ระดับความละเอียดเดียวกับแผนที่ที่เป็นเป้าหมาย และเนื่องจากระยะทางและเวลามีความเกี่ยวพันกับสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองที่ทำงานบนเซลลูลาร์ ออโตมาตา เพราะแต่ละเซลล์จะมีปฏิสัมพันธ์เฉพาะกับเซลล์รอบข้างเท่านั้น ทำให้ขนาดของหน่วยเวลาบนแผนที่ที่มีระดับต่างกันมีขนาดไม่เท่ากัน ในการค้นหาที่ระดับความละเอียดต่ำกว่าความละเอียดเป้าหมายจึงต้องมีการปรับค่าต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องในเชิงเวลา เช่น เวลาเป้าหมายที่เหตุการณ์ควรจะเกิดหรือสิ้นสุดบนแต่ละเซลล์ ก่อนที่จะเริ่มทำการคำนวณ

2.1.5 ไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน (Bilinear interpolation) [7]

ลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน [8] เป็นการใช้สมการเส้นตรงในการหาค่าที่อยู่ ณ ตำแหน่งที่อยู่ระหว่างจุดควบคุมสองจุดที่ทราบค่า ณ ที่ตำแหน่งของจุดควบคุมนั้นๆ อยู่แล้ว



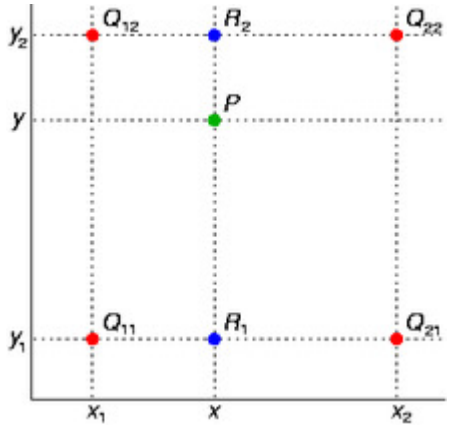
ภาพที่ 7: ตัวอย่างการหาค่าลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน

$$y = y_0 + (y_1 - y_0)\frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

ภาพที่ 8: สมการสำหรับการทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน

เพื่อเป็นตัวอย่างในการทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน ถ้าให้ค่าที่ตำแหน่ง x_0 มีค่าเป็น y_0 และให้ค่าที่ตำแหน่ง x_1 มีค่าเป็น y_1 ดังที่แสดงในภาพที่ 7 จะสามารถหาค่าที่ตำแหน่ง x ได้โดยใช้สมการในภาพที่ 8 ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบโดยให้ความชันระหว่างจุด (x,y) กับจุด (x_0, y_0) มีค่าเท่ากับความชันระหว่างจุด (x_1, y_1) กับจุด (x_0, y_0)

ไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันเป็นการขยายผลต่อจากลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันโดยการนำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันมาใช้กับตาราง 2 มิติ ซึ่งจะมีจุดควบคุมที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นจาก 2 จุดเป็น 4 จุด โดยจะทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันกับจุดควบคุมแต่ละคู่ตามทิศทางใดทิศทางหนึ่งก่อน เพื่อทำการหาค่า ณ ตำแหน่งระหว่างแต่ละคู่จุดควบคุมในทิศทางนั้น แล้วจึงนำค่า ณ ตำแหน่งที่อยู่ระหว่างคู่จุดควบคุมมาทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันอีกครั้งในอีกทิศทางที่ยังไม่ได้ทำการคำนวณก่อนหน้านี้



ภาพที่ 9: ตัวอย่างการหาค่าไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน

เพื่อเป็นตัวอย่างในการทำไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน จากภาพที่ 9 เมื่อให้ Q_{11} แทนพิกัด (x_1, y_1), Q_{12} แทนพิกัด (x_1, y_2), Q_{21} แทนพิกัด (x_2, y_1) และ Q_{22} แทนพิกัด (x_2, y_2) และ R_1 แทนพิกัด (x, y_1), R_2 แทนพิกัด (x, y_2) และ P แทนพิกัด (x, y) และให้ค่าที่ตำแหน่งพิกัดใดๆ แทนด้วย f(Q) เมื่อ Q เป็นตำแหน่งพิกัดใดๆ การหาค่าที่ตำแหน่ง P สามารถทำได้โดยการทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันเพื่อหาค่าที่ตำแหน่ง R_1 และ R_2 ก่อน โดยทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันระหว่างค่าที่ตำแหน่ง Q_{11} กับ Q_{21} และระหว่างค่าที่ตำแหน่ง Q_{12} และ Q_{22} ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันระหว่างค่าที่ตำแหน่ง R_1 และ R_2 เพื่อหาค่าที่ตำแหน่ง P โดยมีสมการต่างๆ แสดงดังในภาพที่ 10

$$f(R_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21})$$

$$f(R_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22})$$

$$f(P) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(R_2).$$

ภาพที่ 10: ตัวอย่างสมการสำหรับการทำไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน

งานวิจัยนี้จะนำวิธีการไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันมาใช้เป็นหนึ่งในวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ โดยนำมาใช้ในการหาค่า ณ ตำแหน่งพิกัดที่อยู่ระหว่างเซลล์เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นที่ตำแหน่งนั้นๆ

2.1.6 ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน (Bicubic interpolation) [9]

คิวบิกอินเตอร์โพเลชัน [9] เป็นการนำสมการพหุนามดีกรี 3 ดังในภาพที่ 11 มาใช้ในการประมาณค่า ณ ตำแหน่งที่อยู่ระหว่างจุดควบคุม 2 จุดที่ทราบค่า ณ ที่ตำแหน่งของจุดควบคุมนั้นๆ อยู่แล้ว โดยให้ x มีค่าในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 และในการประมาณค่าในแต่ละช่วงจะต้องนำจุดควบคุมที่อยู่ข้างเคียงกับจุดควบคุมของช่วงนั้นๆ มาทำการคำนวณด้วย กล่าวคือการประมาณค่าด้วยการทำคิวบิกอินเตอร์โพเลชันจะมีจุดควบคุมที่ต้องนำมาคำนวณสำหรับการประมาณค่าในแต่ละช่วงเป็นจำนวน 4 จุด ในขณะที่การทำลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันจะใช้เพียง 2 จุดควบคุมของช่วงนั้นๆ เท่านั้น ซึ่งเมื่อนำสมการพหุนามดีกรี 3 และสมการอนุพันธ์มาจัดเรียงใหม่ จะได้สมการของค่าของตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 12

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

$$f'(x) = 3ax^2 + 2bx + c$$

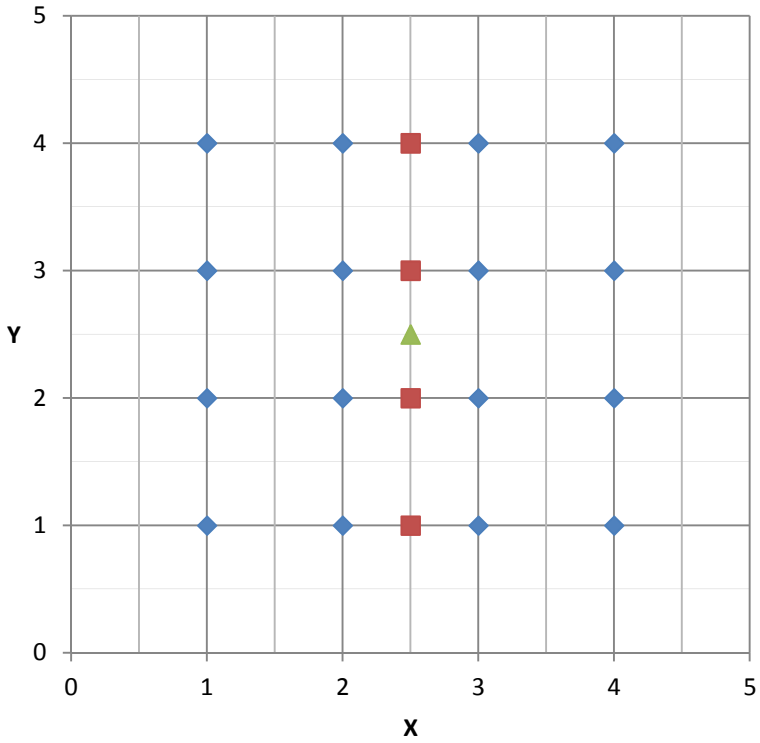
ภาพที่ 11: สมการพหุนามดีกรี 3 และสมการอนุพันธ์

$$a = 2f(0) - 2f(1) + f'(0) + f'(1)$$
$$b = -3f(0) + 3f(1) - 2f'(0) - f'(1)$$
$$c = f'(0)$$
$$d = f(0)$$

ภาพที่ 12: ค่าของตัวแปรต่างๆ ในรูปของค่าที่ตำแหน่ง x=0 และ x=1 และอนุพันธ์ของค่านั้นๆ

ซึ่งในกรณีที่ไม่ทราบค่าที่แท้จริงของอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ณ ตำแหน่งที่ x=0 และ x=1 นั้น สามารถทำการแทนค่าได้หลายวิธี โดยวิธีหนึ่งในนั้นคือแคทมัลรอมสไปลน์ ซึ่งจะทำการแทนค่าโดยนำค่าความชันระหว่างค่าที่จุดควบคุมก่อนหน้ากับค่าที่จุดควบคุมถัดไปของจุดควบคุมที่ต้องการหาค่าอนุพันธ์มาใช้ ซึ่งการประมาณค่าด้วยแคทมัลรอมสไปลน์มีข้อดีคือ การคำนวณสามารถทำได้ง่าย และค่าที่ได้จากการทำการประมาณด้วยวิธีนี้ จะมีความต่อเนื่องถึงอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ทำให้ค่าที่ได้มีความต่อเนื่องระหว่างช่วงของคู่จุดที่ทำการประมาณค่าที่อยู่ต่อเนื่องกัน และค่าที่ได้จากการทำการประมาณ ณ ตำแหน่งของจุดควบคุม จะมีค่าเท่ากับค่าที่อยู่ ณ ตำแหน่งของจุดควบคุมนั้นๆ เสมอ ทำให้ไม่มีความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากการคำนวณที่ทุกตำแหน่งของจุดควบคุม

ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน [9] เป็นการขยายผลจากคิวบิกอินเตอร์โพเลชันโดยนำคิวบิกอินเตอร์โพเลชันมาใช้กับตาราง 2 มิติ ซึ่งจะมีจุดควบคุมที่ต้องใช้เพิ่มจาก 4 จุดเป็น 16 จุด ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13: ตัวอย่างการหาค่าไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน

การที่จะทำการหาค่า ณ ตำแหน่งที่แทนด้วยรูปสามเหลี่ยมในภาพที่ 13 โดยใช้ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันนั้น จะต้องทำการหาค่า ณ ตำแหน่งทั้งสี่ที่แทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมก่อน โดยใช้คิวบิกอินเตอร์โพเลชันกับจุดควบคุมสี่จุดที่แทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมที่อยู่ในแนวขนานกับแกน x ที่อยู่ในแนวระนาบเดียวกับตำแหน่งที่แทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมนั้นๆ เช่น สำหรับตำแหน่งที่แทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมที่อยู่ในแนวระนาบ $y = 1$ จะสามารถหาค่า ณ ตำแหน่งนั้นได้จากการนำค่าที่พิกัด (x, y) เป็น (1,1), (2,1), (3,1), (4,1) มาทำคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน หลังจากนั้นเมื่อได้ค่า ณ ตำแหน่งที่แทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมทั้งสี่ครบถ้วนแล้ว จึงนำค่าทั้งสี่ที่ได้มาทำคิวบิกอินเตอร์โพเลชันอีกครั้งเพื่อหาค่า ณ ตำแหน่งที่แทนด้วยรูปสามเหลี่ยม

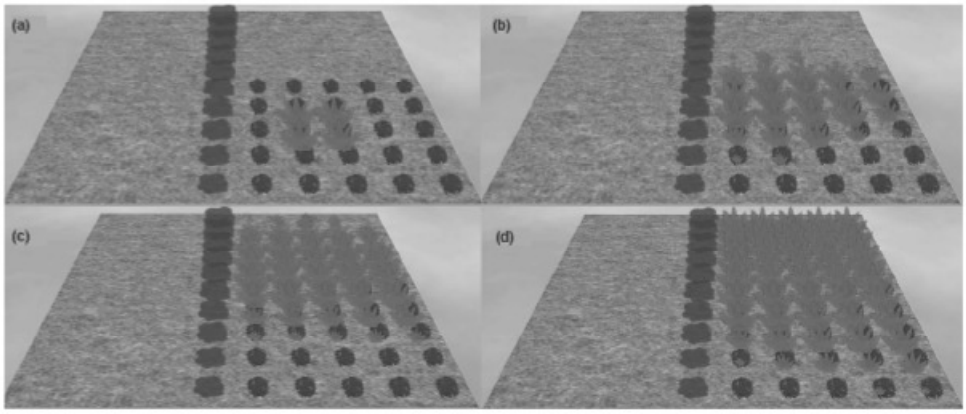
งานวิจัยนี้จะนำวิธีการไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันโดยใช้แคทมัลรอมสไปลน์ในการประมาณค่ามาใช้เป็นหนึ่งในวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งได้เป็นสองด้าน คือ ด้านการออกแบบและใช้งานแผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง และด้านการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในงานที่คล้ายกับงานวิจัยนี้

2.2.1 งานวิจัยด้านการออกแบบและใช้งานแผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง

Sweetser, P. and Wiles, J. [1] (Scripting versus Emergence Issues for Game Developers and Players in Game Environment Design.) ได้พัฒนา และทดสอบระบบสภาพแวดล้อมที่เรียกว่าระบบ EmerGEnT ซึ่งประกอบด้วยเซลลูลาร์ ออโตมาตาสองมิติที่สถานะ และสมบัติมีค่าต่อเนื่อง และใช้กฎการเปลี่ยนสถานะแบบแน่นอน เพื่อใช้ในเกมวางแผนแบบใช้เวลาจริง (Real-Time Strategy Games) โดยได้ทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมของไฟ, น้ำ และการระเบิด โดยการกำหนดสมบัติทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมเหล่านั้นให้เป็นสมบัติของเซลล์ซึ่งแทนพื้นที่พื้นที่หนึ่ง และใช้กฎที่เลียนแบบกฎทางฟิสิกส์ ในการควบคุม โดยดัดแปลงกฎมาจากบทความของ Forsyth [10] โดยถึงแม้ว่าระบบนี้จะไม่ได้ใช้กฎทางฟิสิกส์ที่ซับซ้อนในการจำลองสภาพแวดล้อม แต่สภาพแวดล้อมที่จำลองได้ก็มีรายละเอียดมากพอที่จะใช้ในเกมได้เป็นอย่างดี โดยตัวอย่างการเกิดไฟไหม้ในระบบ EmerGEnT ได้แสดงไว้ในภาพที่ 14



ภาพที่ 14: ระบบ EmerGEnT แสดงการเกิดไฟไหม้จากป่าบริเวณมุมล่างขวา ซึ่งถูกลมพัดไปทางเหนือ และถูกขวางโดยแม่น้ำ [1]

ระบบ EmerGEnT แบ่งการทำงานเป็นสามระดับคือ

1. ระดับพฤติกรรม (Behavior) เป็นระดับที่แสดงพฤติกรรมของสภาพแวดล้อมตามสมบัติของเซลล์ ให้ผู้เล่นเห็นได้แก่ การไหม้ (Burn), ปริมาณน้ำ (Fluid) และการระเบิด (Explosion)

2. ระดับกฎ (Rule) คือกฎที่ควบคุมการการเปลี่ยนสมบัติของเซลล์ โดยแบ่งได้เป็นกฎสำหรับพฤติกรรมระหว่างเซลล์ และกฎสำหรับพฤติกรรมในเซลล์
   2.1. กฎสำหรับพฤติกรรมระหว่างเซลล์ จะขึ้นกับทั้งสมบัติในเซลล์เอง และเซลล์รอบข้างสี่ทิศ ประกอบด้วย
      - การถ่ายเทความร้อน – พลังงานความร้อนจะไหลจากที่ที่อุณหภูมิสูงไปต่ำ
      - การไหลของน้ำ – น้ำจะไหลไปเซลล์ข้างเคียงเมื่อมีปริมาณมากกว่าที่รองรับได้ โดยปริมาณน้ำที่จะไหลไปขึ้นกับความแตกต่างของความสูงของทั้งสองเซลล์
      - การถ่ายเทความดัน – ความดันจะไหลจากที่ที่ความดันสูงไปต่ำ โดยถ้าความดันแตกต่างกันมากจะเกิดการระเบิดซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นได้
   2.2. กฎสำหรับพฤติกรรมในเซลล์ จะขึ้นกับสมบัติในเซลล์เท่านั้น ประกอบด้วย
      - การลุกไหม้ของไฟ – เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าระดับหนึ่งเซลล์จะติดไฟและทำให้เชื้อเพลิงในเซลล์ลดลง
      - ลม – ประกอบด้วย ทิศทางลม (Wind Direction) ซึ่งมีได้สี่ทิศ และความเร็วลม (Wind Speed) เป็นค่าคงที่ที่เหมือนกันทั้งแผนที่ มีผลต่อการทิศทาง และปริมาณการถ่ายเทความร้อน
      - ฝนและความชื้น – มีผลต่อปริมาณน้ำในเซลล์ และการเกิดไฟ
3. ระดับสมบัติ (Property) เป็นส่วนที่ควบคุมการแสดงพฤติกรรมของเซลล์ตามกฎที่กำหนด โดยสมบัติประกอบด้วย
   3.1. สมบัติของเซลล์ (Cell Properties) เป็นสมบัติที่แตกต่างกันในแต่ละเซลล์ ประกอบด้วย
      - ลักษณะของพื้นที่ (Material)
      - อุณหภูมิ (Temperature)
      - มวลของเชื้อเพลิง (Mass)
      - ความเสียหายของเชื้อเพลิงจากการลุกไหม้ (Damage)

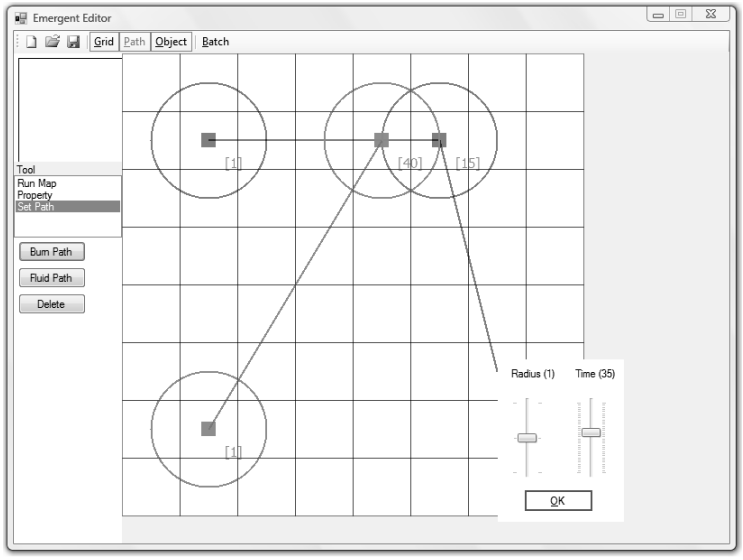
- ความชื้น (Wetness)
- ความสูง (Height)
- ความดัน(Pressure)

3.2. สมบัติของพื้นที่ (Material Properties) เป็นสมบัติที่เหมือนกันในเซลล์ที่มีพื้นที่แบบเดียวกัน และจะมีค่าคงที่เสมอ ประกอบด้วย

- จุดติดไฟ (Flash Point)
- อุณหภูมิของไฟ (Burn Temp)
- อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Burn Rate)
- อัตราการไหม้สูงสุด (Max Burn)
- ความจุความร้อนจำเพาะ (SHC: Specific Heat Capacity)
- ปริมาณน้ำที่เซลล์รองรับได้ (Max Fluid)

ระบบ EmerGEnT ที่ใช้ในงานของSweetser และ Wiles จะใช้พื้นที่ขนาดกว้าง 10 เซลล์ ยาว 10 เซลล์ โดยเซลล์มีขนาดประมาณขนาดของตัวละครในเกมสิบถึงยี่สิบตัวละคร และมีลักษณะของพื้นที่สามแบบคือ หญ้า, ป่า และน้ำ กำหนดให้ความเร็วลมมีค่าเป็น 10 ถ้ามีลม ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบดังกล่าวนี้มีค่าต่าง ๆ ที่ต้องทำการกำหนดอยู่หลายค่าเพื่อให้แสดงพฤติกรรมได้ตามที่ต้องการ

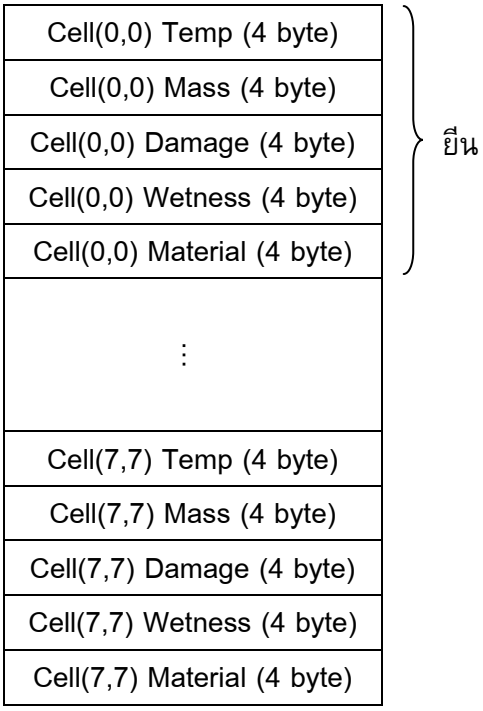
Kotrajaras, V. and Kumnoonsate T. [2] (Fine-tuning Parameters for Emergent Environments in Games Using Artificial Intelligence.) ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมกำหนดสมบัติของแผนที่โดยอัตโนมัติโดยทำงานร่วมกับแผนที่ที่ใช้ระบบ EmerGEnt โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเข้ามาช่วยในการกำหนดค่าสมบัติให้กับเซลล์เพื่อให้แผนที่สามารถแสดงพฤติกรมได้ตามที่ผู้ใช้ต้องการ โดยมีรายละเอียดการใช้งานโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ก โปรแกรมนี้ทำงานโดยรับเหตุการณ์เป้าหมายบนแผนที่ในรูปของจุดควบคุมเส้นทาง (Way Point) รัศมีของเหตุการณ์รอบจุดควบคุม และเวลาที่ต้องการให้เหตุการณ์นั้นๆ เกิดขึ้นจากผู้ใช้ ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15: ส่วนกำหนดจุดควบคุมเส้นทาง

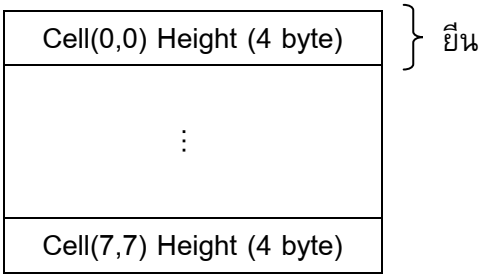
ต่อจากนั้น โปรแกรมจะทำการแปลงข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของตารางของเวลาที่เหตุการณ์จะต้องเริ่มเกิดขึ้นและตารางของเวลาที่เหตุการณ์จะต้องสิ้นสุดของแต่ละเซลล์ เพื่อใช้ในการวัดค่าความเหมาะสมในการค้นหาในภายหลัง จากนั้นโปรแกรมจะทำการค้นหาเพื่อปรับค่าสมบัติที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์เป้าหมายโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหา โดยให้โครโมโซมแทนด้วยสมบัติของเซลล์ทั้งหมดบนแผนที่ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหตุการณ์เป้าหมาย โดยให้แต่ละยีนเป็นตัวแทนของเซลล์แต่ละเซลล์ ซึ่งจะประกอบด้วยสมบัติทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหตุการณ์เป้าหมายของเซลล์แต่ละเซลล์ และใช้การไขว้เปลี่ยนแบบสม่ำเสมอซึ่งทำให้ค่าของยีนในโครโมโซมตั้งต้นแต่ละยีนจะถูกสุ่มเลือกไปปรากฏ โดยใช้สมการ (2) และสมการ (3) ในการรวมค่าเพื่อทำการกำหนดค่าให้กับยีนของโครโมโซมที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ด้วยการไขว้เปลี่ยน

- โครโมโซมการลามของไฟประกอบด้วย ลักษณะของพื้นที่ อุณหภูมิ มวลของเชื้อเพลิง ความเสียหายของเชื้อเพลิงจากการลุกไหม้ และความชื้น ดังภาพที่ 16



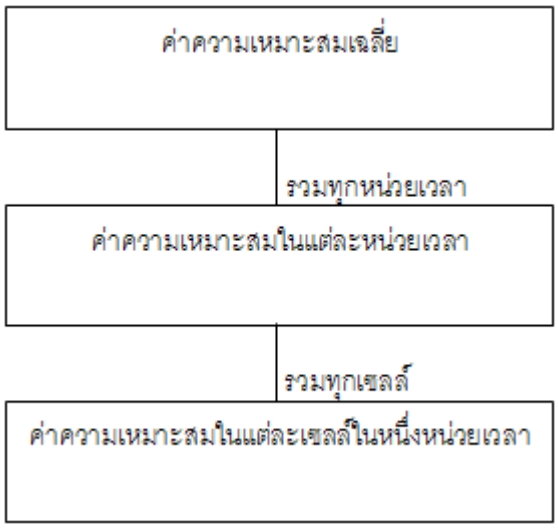
ภาพที่ 16: ข้อมูลในโครโมโซมการลามของไฟ

- โครโมโซมการไหลของน้ำประกอบด้วย ความสูง ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17: ข้อมูลในโครโมโซมการไหลของน้ำ

สำหรับการค้นหานั้น จะใช้กลุ่มประชากรขนาด 1000 หน่วยเพื่อทำการค้นหาเป็นจำนวน 100 รุ่น การวัดค่าความเหมาะสมของโครโมโซมจะทำโดยทำการกำหนดคุณสมบัติของเซลล์บนแผนที่ตามค่าในโครโมโซมแล้วตรวจสอบว่าเกิดเหตุการณ์เป็นไปตามตารางเวลาที่สร้างขึ้นก่อนหน้านี้มากน้อยเพียงใด โดยการวัดค่าความเหมาะสมของแต่ละเหตุการณ์จะมีลำดับการทำงานดังภาพที่ 18 ซึ่งมีรายละเอียดในการทำงานดังนี้



ภาพที่ 18: ลำดับการวัดค่าความเหมาะสม

1. หาค่าความเหมาะสมเฉลี่ยในทุกหน่วยเวลาที่เกิดเหตุการณ์ โดยมีค่าสูงสุดใกล้เคียง 1 ตามสมการ (4) ซึ่งใช้สมการ (5) และสมการ (6) ในการถ่วงน้ำหนักจากค่าความเหมาะสมในแต่ละหน่วยเวลา

$$fitness = \frac{\sum_{i=1}^{n} fitness_{t=i}^{waypoint} + \sum_{j=1}^{m} fitness_{t=j}^{non-waypoint}}{2n+m} \quad (4)$$

$$fitness_t^{waypoint} = (1.8 + \frac{0.2 \times t}{time_{\max}}) \times fitness_t \quad (5)$$

$$fitness_t^{non-waypoint} = (0.8 + \frac{0.2 \times t}{time_{\max}}) \times fitness_t \quad (6)$$

โดย $fitness_t^{waypoint}$ คือค่าความเหมาะสมในแต่ละหน่วยเวลาที่มีจุดกำหนดเส้นทางอยู่ $fitness_t^{non-waypoint}$ คือค่าความเหมาะสมในแต่ละหน่วยเวลาที่ไม่มีจุดกำหนดเส้นทางอยู่ t คือหน่วยเวลาที่ต้องการค่าความเหมาะสม $time_{\max}$ คือหน่วยเวลาสูงสุดที่ยังมีเหตุการณ์เกิดขึ้นบนแผนที่ และ $fitness_t$ คือค่าความเหมาะสมในแต่ละหน่วยเวลาที่ยังไม่ได้ถ่วงน้ำหนัก

การถ่วงน้ำหนักในหน่วยเวลาที่มีจุดกำหนดเส้นทางอยู่จะถูกถ่วงน้ำหนักประมาณ 2 เท่าของหน่วยเวลาอื่นๆ ($1.8 + x$ เทียบกับ $0.8 + x$) เนื่องจากเป็นหน่วยเวลาที่ใช้วัดผลการทำงาน แต่หน่วยเวลาอื่นๆมีค่าความเหมาะสมเพื่อให้เกิดเหตุการณ์ตามเส้นทางเท่านั้น

ค่าความเหมาะสมของเหตุการณ์ในหน่วยเวลาที่เกิดทีหลังจะถูกถ่วงน้ำหนักมากกว่าค่าความเหมาะสมของเหตุการณ์ในหน่วยเวลาที่เกิดก่อน ดังในส่วน $\frac{0.2 \times t}{time_{\max}}$ ของสมการ เนื่องจากในการทดลองมักจะพบปัญหาเหตุการณ์จบก่อน

กำหนด หรือเคลื่อนที่ไปไม่ถึงจุดควบคุมในเวลาหลังๆ แต่ถ้าหากกำหนดการถ่วงน้ำหนักในส่วนนี้มากเกินไปจะพบปัญหาความร้อนเคลื่อนที่ไปไหม้ในช่วงหลังๆของเส้นทางโดยไม่ไหม้ส่วนต้นทาง

2. ค่าความเหมาะสมในแต่ละหน่วยเวลา คือผลรวมของค่าความเหมาะสมของเซลล์ที่เกิดเหตุการณ์ กับเซลล์ที่ถูกกำหนดให้เกิดเหตุการณ์ในหน่วยเวลานั้น ($relevantcell$) ต่อจำนวนเซลล์ที่ถูกกำหนดให้เกิดเหตุการณ์ในช่วงเวลานั้นๆ (m) คูณด้วยค่าความเหมาะสมสูงสุดในแต่ละเซลล์ในหนึ่งหน่วยเวลา (10 หน่วย) โดยจะมีค่าสูงสุดใกล้เคียง 1 ตามสมการ (7)

$$fitness_t = \frac{\sum_{i=1}^{n} fitness(relevantCell_i)}{m \times 10} \tag{7}$$

3. ค่าความเหมาะสมในแต่ละเซลล์ในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าสูงสุดเป็น 10 โดยการคิดคะแนนจะแบ่งได้เป็น

   - เกิดเหตุการณ์ในเซลล์ที่อยู่นอกเส้นทาง – โดยถ้าเป็นเซลล์ที่อยู่ติดกับเซลล์ที่อยู่ในเส้นทางจะถูกหัก 1 คะแนน แต่ถ้าเป็นเซลล์ที่อยู่ห่างออกไปจะถูกหัก 5 คะแนน เนื่องจากการเหตุการณ์ในเซลล์ที่อยู่ติดกับเซลล์ที่อยู่ในเส้นทางจะปรับเหตุการณ์กลับเข้าเส้นทางได้ง่ายกว่า

   - ไม่เกิดเหตุการณ์ในเซลล์ตามเวลาที่ควรเกิด – ในกรณีการลามของไฟจะได้คะแนนเป็น 2 เท่าของอุณหภูมิของเซลล์ต่ออุณหภูมิสูงสุด (5000 หน่วย) เนื่องจากถึงแม้ว่าเซลล์จะไม่ติดไฟแต่ก็ยังสามารถส่งผ่านความร้อนไปยังเซลล์ถัดไปในเส้นทางได้ และถ้าเซลล์มีอุณหภูมิสูงจะทำให้เซลล์เกิดการลุกไหม้ได้ง่าย ส่วนการไหลของน้ำจะไม่มีคะแนน เนื่องจากไม่มีค่าสมบัติที่จะนำมาคิดคะแนนในส่วนนี้

   - เกิดเหตุการณ์ในเซลล์ตามเวลาที่ควรเกิด – จะได้ 8 คะแนน และในกรณีการลามของไฟ จะได้คะแนนเพิ่มอีกไม่เกิน 2 คะแนน เท่ากับ 2 เท่าของค่าการไหม้ต่อครึ่งหนึ่งของอัตราการไหม้สูงสุดของพื้นที่ที่มีอัตราการไหม้สูงสุดน้อยที่สุด (หญ้า; 200 หน่วย) สำหรับการลามของไฟ ส่วนการไหลของน้ำจะได้คะแนนเพิ่มเท่ากับ 2 เท่าของปริมาณน้ำต่อครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำที่เซลล์รองรับได้ (60 หน่วย) ซึ่งก็คือถ้าเหตุการณ์มีขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ (ซึ่งเป็นขนาดของเหตุการณ์ที่

เครื่องมือแสดงให้ผู้ใช้เห็นในส่วนของเหตุการณ์ที่เครื่องมือออกแบบ) จะได้คะแนนเต็ม 2 คะแนน เนื่องจากถ้าเกิดเหตุการณ์ในเซลล์น้อยจะส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ในช่วงหลังๆของเส้นทางได้ยาก

- เกิดเหตุการณ์ก่อนเวลาที่ควรเกิดไม่เกิน 1 หน่วยเวลา – จะได้คะแนนเท่ากับ 5 ลบด้วยผลต่างของเวลา ซึ่งในส่วนนี้จะมีคะแนนแค่ 4 หรือ 0 เนื่องจากการเกิดเหตุการณ์เร็วไป 1 หน่วยเวลายังสังเกตได้ไม่ชัดเจน จึงให้คะแนนค่อนข้างสูง

- เกิดเหตุการณ์หลังเวลาที่ควรเกิดไม่เกิน 4 หน่วยเวลา – จะได้คะแนนเท่ากับ 5 ลบด้วยผลต่างของเวลา สำหรับการลามของไฟ เนื่องจากการลามของไฟโดยอิสระมักจะมีหางของไฟเกิดขึ้นด้วย โดยการไหลของน้ำจะไม่คิดคะแนนในส่วนนี้ เนื่องจากน้ำเมื่อเกิดแล้วจะคงอยู่ในเซลล์ตลอด

นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังมีการนำวิธีการปีนเขาชันสุดมาช่วยในการค้นหาเป็นระยะๆ ตามจำนวนรุ่นที่ได้ทำการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอีกด้วยเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลลัพธ์ของการค้นหาให้ดียิ่งขึ้น โดยโปรแกรมนี้รองรับการทำงานบนแผนที่ขนาดกว้าง 8 เซลล์ ยาว 8 เซลล์ และทำการคำนวณบนหน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียว โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมนี้ มีเหตุการณ์เกิดขึ้นตามจุดที่สำคัญมากกว่าร้อยละ 70 และเกิดเหตุการณ์นอกเส้นทางน้อยกว่าร้อยละ 30 แต่เมื่อนำมาทดลองเพื่อทำการค้นหาบนแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยทำการทดลองกับแผนที่ที่มีขนาดกว้าง8 เซลล์ ยาว 8 เซลล์ เปรียบเทียบกับการทดลองกับแผนที่ที่มีขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์ โดยสำหรับแผนที่แต่ละขนาดนั้นจะสุ่มสร้างเหตุการณ์ทดสอบขึ้นมาทั้งหมด 100 เหตุการณ์ ซึ่งประกอบด้วยเหตุการณ์การลามของไฟจำนวน 50 เหตุการณ์ และเหตุการณ์การไหลของน้ำจำนวน 50 เหตุการณ์ จากผลการทดลอง พบว่ามีปัญหาต่างๆ ดังต่อไปนี้

ในแง่ของเวลา เวลาที่ใช้ในการค้นหาเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อทำการค้นหาบนแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 1 โดยแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์ของไฟและเหตุการณ์ของน้ำบนแผนที่ขนาดกว้าง 8 เซลล์ ยาว 8 เซลล์ และกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์

ตารางที่ 1: ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์ของไฟและเหตุการณ์ของน้ำบนแผนที่ขนาด 8x8 เซลล์และ 32x32 เซลล์ โดยแสดงในรูปแบบ นาที : วินาที

เหตุการณ์ \ ขนาด	8x8	32x32
ไฟ	00 : 46	23 : 15
น้ำ	00 : 20	7 : 38

สาเหตุที่การค้นหาใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในการทำงานบนแผนที่ขนาดใหญ่เนื่องจากการวัดค่าความเหมาะสมแต่ละรอบมีการคำนวณของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองเป็นจำนวนมากเพราะต้องทำการวัดค่าความเหมาะสมในแต่ละหน่วยเวลา โดยการคำนวณในส่วนนี้สามารถทำการคำนวณทุกๆ เซลล์ไปพร้อมๆ กันได้ แต่การใช้การคำนวณบนหน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียวทำให้การคำนวณในส่วนนี้จะถูกคำนวณตามลำดับทีละเซลล์ทำให้การทำงานล่าช้ากว่าที่ควรจะเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องทำการคำนวณกับเซลล์จำนวนมาก นอกจากนั้นการคำนวณในส่วนของการไขว้เปลี่ยนและการกลายพันธุ์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมก็ถูกคำนวณตามลำดับทีละเซลล์ด้วยเช่นกันโดยที่จริงๆ แล้วสามารถทำการคำนวณไปพร้อมๆ กันแบบขนานได้เช่นกันเนื่องจากเป็นการคำนวณแต่ละเซลล์แยกจากกัน ซึ่งในจุดนี้ทำให้การทำงานล่าช้ามากยิ่งขึ้น

ในแง่ของคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้ ผลลัพธ์ที่ได้วัดความถูกต้องโดยใช้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงต่อเหตุการณ์ที่โปรแกรมกำหนดให้จากเหตุการณ์ที่ผู้ใช้ลากในพื้นที่ ณ เวลาที่ผู้ใช้กำหนด โดยผลลัพธ์ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2 โดยแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาสำหรับเหตุการณ์ของไฟและเหตุการณ์ของน้ำบนแผนที่ขนาดกว้าง 8 เซลล์ ยาว 8 เซลล์ และกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์

ตารางที่ 2: ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาสำหรับเหตุการณ์ของไฟและเหตุการณ์ของน้ำบนแผนที่ขนาด 8x8 เซลล์และ 32x32 เซลล์ โดยแสดงในหน่วยร้อยละ (%)

เหตุการณ์ \ ขนาด	8x8	32x32
ไฟ	68.82	34.37
น้ำ	68.57	35.28

สาเหตุที่ผลลัพธ์ที่ได้มีคุณภาพลดลงอย่างมากเมื่อทำการค้นหาบนแผนที่ขนาดใหญ่เนื่องมาจากการที่กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ของระบบ EmerGEnt ที่ใช้ในงานวิจัยมีข้อบกพร่อง

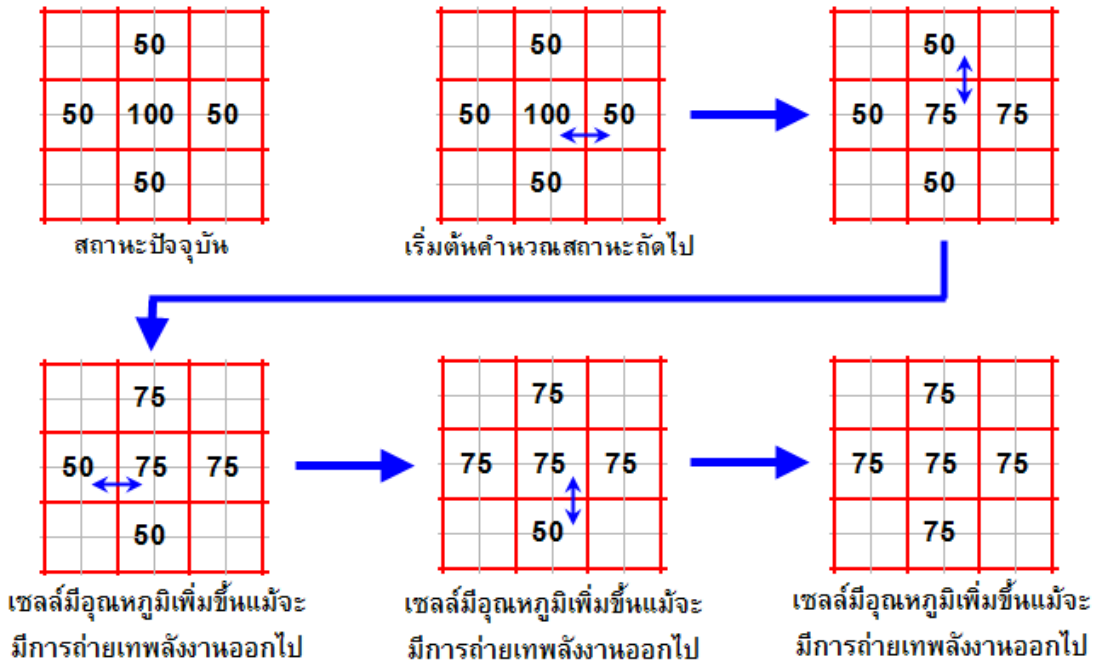
สำหรับกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการถ่ายเทความร้อนดังที่แสดงในภาพที่ 19 นั้น มีข้อบกพร่องทำให้เหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นผิดไปจากที่ควรจะเป็นภายใต้สถานการณ์ต่างๆ อย่างไม่มีความแน่นอน โดยข้อบกพร่องดังกล่าวเกิดจากความพยายามในการกำจัดสถานการณ์ที่เกิดการถ่ายเทความร้อนกลับไปกลับมาระหว่างคู่เซลล์เดิม (Oscillation) ที่จะเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ที่เป็นฝ่ายรับพลังงานเมื่อได้รับพลังงานแล้วจะทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าเซลล์ที่เป็นฝ่ายให้ แล้วทำให้ในหน่วยเวลาถัดไปเซลล์ที่เคยเป็นฝ่ายรับจะกลายเป็นฝ่ายให้ และเซลล์ที่เคยเป็นฝ่ายให้จะกลายเป็นฝ่ายรับแทน โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นเพราะในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในขณะหนึ่งๆ จะให้ความสนใจเฉพาะเซลล์ที่กำลังทำการคำนวณและเซลล์เพื่อนบ้านที่กำลังทำการคำนวณเท่านั้น โดยไม่สนใจเซลล์เพื่อนบ้านเซลล์อื่นๆ อีก 3 เซลล์ และในการกำจัด Oscillation ก็ทำโดยการนำค่าอุณหภูมิในสถานะปัจจุบันมาใช้ในการคำนวณ แล้วนำผลที่ได้มากำหนดเป็นค่าอุณหภูมิของเซลล์ในสถานะถัดไปโดยตรง ซึ่งการกระทำดังกล่าวส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนหลายๆ อย่างขึ้นในระบบ เช่น

- ถ้าหากเซลล์ที่กำลังสนใจ ได้ทำการถ่ายเทพลังงานให้กับเซลล์เพื่อนบ้านเซลล์อื่นๆ แล้วจึงทำการถ่ายเทพลังงานให้กับเซลล์เพื่อนบ้านที่ทำให้เกิดสถานการณ์ Oscillation ขึ้น การคำนวณเพื่อกำจัด Oscillation อาจทำให้ค่าอุณหภูมิของเซลล์นั้นๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เพราะเป็นการนำค่าอุณหภูมิของเซลล์ในสถานะปัจจุบันมาใช้คำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิแบบถ่วงน้ำหนักด้วยค่าความจุความร้อนของเซลล์ที่กำลังสนใจและเซลล์เพื่อนบ้านที่กำลังทำการคำนวณ ดังตัวอย่างในภาพที่ 20 เมื่อกำหนดให้ทุกเซลล์มีค่าลักษณะของพื้นที่เป็นแบบเดียวกันทั้งหมดและมีมวลเท่ากันในทุกเซลล์ โดยตัวเลขที่แสดงคือค่าอุณหภูมิของเซลล์ และมีค่าคงที่ของการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 0.5

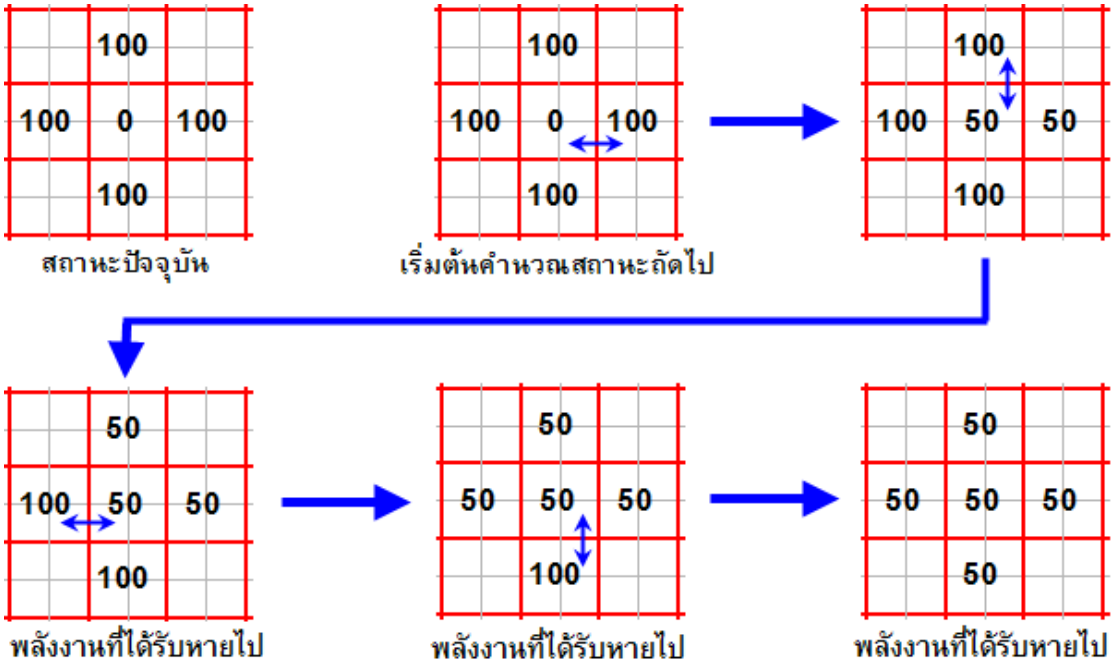
- ในสถานการณ์กลับกัน ถ้าหากเซลล์เพื่อนบ้านได้รับพลังงานมาจากเซลล์อื่นๆ ก่อนหน้านั้น แล้วเกิดสถานการณ์ Oscillation ขึ้นกับเซลล์ที่กำลังสนใจ การคำนวณเพื่อกำจัด Oscillation จะทำให้พลังงานที่ได้รับมาก่อนหน้านั้นหายไป เนื่องจากการนำค่าอุณหภูมิของเซลล์ในสถานะปัจจุบันมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก ดังตัวอย่างในภาพที่ 21 เมื่อกำหนดให้ทุกเซลล์มีค่าลักษณะของพื้นที่เป็นแบบเดียวกันทั้งหมดและมีมวลเท่ากันในทุกเซลล์ โดยตัวเลขที่แสดงคือค่าอุณหภูมิของเซลล์ และมีค่าคงที่ของการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 0.5

```
HCCell      = cell.material.SHC * cell.Mass;
HCNeighbour = ncell.material.SHC * ncell.Mass;
EnergyFlow  = (cell.Temp - ncell.Temp) * HCCell;
EnergyFlow  *= ConstantEnergyFlowFactor

if ( notAgainstWind ) {
    if ( EnergyFlow > 0 ) {
        ncell.NewTemp += EnergyFlow / HCNeighbour;
        cell.NewTemp  -= EnergyFlow / HCCell;
    }
    // Kill Oscillations
    if ( ( EnergyFlow > 0 ) && ( ncell.NewTemp > cell.NewTemp ) ) {
        TotalHC = HCCell + HCNeighbour;
        AverageTemp = ((HCCell * cell.Temp) + (HCNeighbour * ncell.Temp)) / TotalHC;
        cell.NewTemp  = AverageTemp;
        ncell.NewTemp = AverageTemp;

        if ( isWithWind ) {
            cell.NewTemp  /= (1 + (windSpeed * windConstant);
            ncell.NewTemp *= (1 + (windSpeed * windConstant);
        }
    }
}
```

ภาพที่ 19: กฎการถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์



ภาพที่ 20: ตัวอย่างการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์แบบผิดพลาด



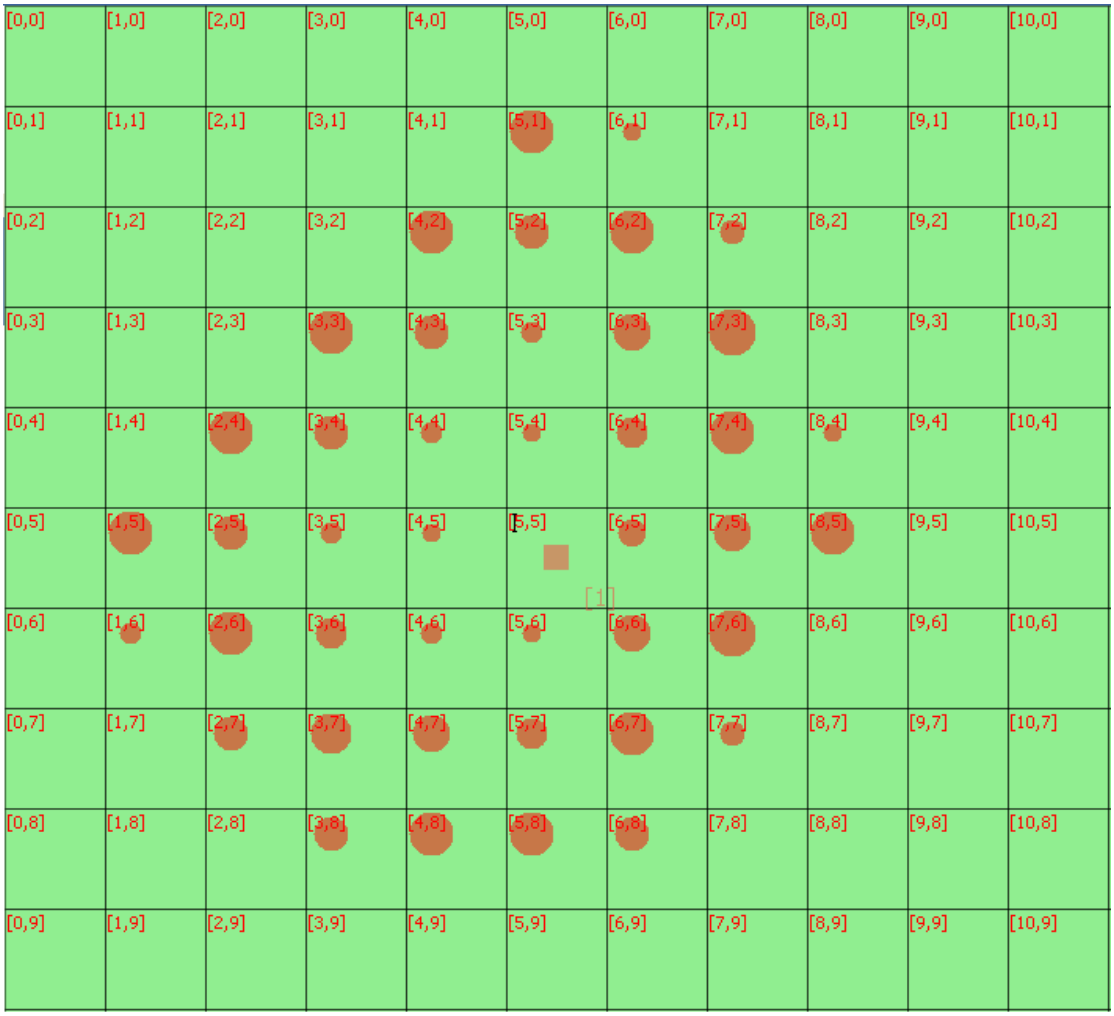
ภาพที่ 21: ตัวอย่างการหายไปของอุณหภูมิของเซลล์

โดยมีตัวอย่างของเหตุการณ์ลักษณะนี้ เช่น

- การลามของไฟในทิศทางต่าง ๆ ภายใต้สถานการณ์หนึ่ง ๆ ที่แม้ว่าเซลล์แวดล้อมของเซลล์ที่เป็นต้นกำเนิดการไหม้จะมีค่าสมบัติต่าง ๆ สมมาตรกัน แต่ไฟกลับลามไปในทิศทางต่าง ๆ ได้ไม่เท่ากัน ดังตัวอย่างในภาพที่ 22 และภาพที่ 23 โดยภาพที่ 22 แสดงค่ามวลของเซลล์แต่ละเซลล์ในแผนที่ ซึ่งค่าสมบัติอื่น ๆ มีค่าเหมือนกันทั้งหมดในทุกเซลล์ โดยเซลล์ที่ตำแหน่ง [5,5] มีมวลเท่ากับ 10 และเซลล์ที่ตำแหน่ง [5,4], [4,5], [6,5], [5,6] มีมวลเท่ากับ 100 และเซลล์อื่น ๆ นอกเหนือจากนี้มีมวลเท่ากับ 1 และภาพที่ 23 แสดงพฤติกรรมการลามของไฟหลังจากทำการจำลองเหตุการณ์ผ่านไป 6 หน่วยเวลาโดยมีจุดกำเนิดการลามของไฟอยู่ที่เซลล์ที่ตำแหน่ง [5,5]

[0,0]	[1,0]	[2,0]	[3,0]	[4,0]	[5,0]	[6,0]	[7,0]	[8,0]	[9,0]	[10,0]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
[0,1]	[1,1]	[2,1]	[3,1]	[4,1]	[5,1]	[6,1]	[7,1]	[8,1]	[9,1]	[10,1]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
[0,2]	[1,2]	[2,2]	[3,2]	[4,2]	[5,2]	[6,2]	[7,2]	[8,2]	[9,2]	[10,2]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
[0,3]	[1,3]	[2,3]	[3,3]	[4,3]	[5,3]	[6,3]	[7,3]	[8,3]	[9,3]	[10,3]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
[0,4]	[1,4]	[2,4]	[3,4]	[4,4]	[5,4]	[6,4]	[7,4]	[8,4]	[9,4]	[10,4]
1	1	1	1	1	100	1	1	1	1	1
[0,5]	[1,5]	[2,5]	[3,5]	[4,5]	[5,5]	[6,5]	[7,5]	[8,5]	[9,5]	[10,5]
1	1	1	1	100	10	100	1	1	1	1
[0,6]	[1,6]	[2,6]	[3,6]	[4,6]	[5,6]	[6,6]	[7,6]	[8,6]	[9,6]	[10,6]
1	1	1	1	1	100	1	1	1	1	1
[0,7]	[1,7]	[2,7]	[3,7]	[4,7]	[5,7]	[6,7]	[7,7]	[8,7]	[9,7]	[10,7]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
[0,8]	[1,8]	[2,8]	[3,8]	[4,8]	[5,8]	[6,8]	[7,8]	[8,8]	[9,8]	[10,8]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
[0,9]	[1,9]	[2,9]	[3,9]	[4,9]	[5,9]	[6,9]	[7,9]	[8,9]	[9,9]	[10,9]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ภาพที่ 22: ค่ามวลของแต่ละเซลล์ในแผนที่ตัวอย่าง



ภาพที่ 23: ภาพเหตุการณ์การลามของไฟหลังจากผ่านไป 6 หน่วยเวลา

ซึ่งข้อผิดพลาดต่างๆ ในรูปแบบนี้จะปรากฏให้เห็นได้ง่ายยิ่งขึ้นและส่งผลมากขึ้นเมื่อแผนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้คุณภาพของผลการค้นหาที่ได้จากการค้นหาบนแผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์มีคุณภาพลดลง เนื่องจากในการค้นหานั้น จะใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการค้นหา โดยการแปลงจุดควบคุมเส้นทางและเส้นทางของเหตุการณ์ให้อยู่ในรูปของตารางเวลา ซึ่งจะทำการให้ค่าคะแนนความเหมาะสมเมื่อเกิดเหตุการณ์ขึ้นในแต่ละเซลล์ ณ เวลาที่กำหนดไว้ที่ตำแหน่งนั้นๆ ทำให้ในการทำงานจริง การค้นหาจะตั้งต้นจากจุดเริ่มต้นของเหตุการณ์แล้วค่อยๆ ขยายขอบเขตออกไปเรื่อยๆ ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ แต่ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับค่าสมบัติของเซลล์มีผลกระทบกับความยากง่ายในการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ อย่างชัดเจน รวมถึงทิศทางของเส้นทางของเหตุการณ์ก็มีผลด้วยเช่นกัน ทำให้เมื่อแผนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีจำนวนเซลล์ที่เกี่ยวข้องมากขึ้น ข้อผิดพลาดดังกล่าวจึงปรากฏให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นและส่งผลมากขึ้น

นอกจากนั้น กฎการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์ที่ใช้ดังที่แสดงในภาพที่ 24 ก็มีข้อบกพร่องเช่นกัน กล่าวคือ กฎดังกล่าวจะทำการคำนวณหาค่าความเสียหายก่อนโดยใช้ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นของเซลล์ในการคำนวณ แล้วจึงนำค่าความเสียหายมาหักออกจากค่าการเผาไหม้ ซึ่งลำดับการคำนวณนี้ส่งผลให้ถ้าหากเซลล์มีค่าอุณหภูมิสูงถึงระดับหนึ่งแล้ว จะสามารถเกิดสถานการณ์ที่ค่าความเสียหายมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าการเผาไหม้สูงสุดได้ ซึ่งส่งผลให้เซลล์ดังกล่าวจะไม่มีค่าการเผาไหม้เกิดขึ้นเลย แต่ในขณะเดียวกันกลับมีค่าความเสียหายเกิดขึ้น

```
Temp = cell.Temp - (cell.material.FlashPoint + cell.Wetness);
if ( Temp > 0 )
    cell.Damage += ((Temp * cell.material.BurnRate) - cell.Wetness) * burnConst;
if ( Temp > (cell.material.MaxBurn * 2))
    Burn = cell.material.MaxBurn;
else if ( Temp > 0 )
    Burn = (1 - ((0.25 * Temp) / cell.material.MaxBurn) * Temp;
if ( Burn > cell.material.MaxBurn )
    Burn = cell.material.MaxBurn;
Burn -= cell.Damage;
if ( Burn < 1 )
    Burn = 0;
cell.NewTemp += Burn * cell.material.BurnTemp;
cell.Burn = Burn;
```

ภาพที่ 24: กฎการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์

สำหรับกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการไหลของน้ำดังที่แสดงในภาพที่ 25 นั้น มีข้อบกพร่องคือ อัตราการไหลของน้ำขึ้นกับอัตราส่วนของค่าความสูงโดยตรง ทำให้แม้ว่าจะมีส่วนต่างของความสูงระหว่างคู่เซลล์เท่ากัน ก็จะมีความสามารถในการถ่ายเทน้ำระหว่างเซลล์ไม่เท่ากัน รวมถึงปริมาณน้ำที่เกิดการถ่ายก็ไม่เท่ากันด้วยเช่นกัน โดยเซลล์จะมีค่าความจุน้ำสูงสุดที่ 200 หน่วยเสมอ และค่าคงที่ของการไหลมีค่าเท่ากับ 0.1 และค่าคงที่ของการไหลขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.5

```
if ( ( ncell.Height < cell.Height ) &&
     ( cell.Fluid > (cell.material.maxFluid * (ncell.Height / cell.Height) ) ) {
     flow = (cell.Fluid - ncell.Fluid) * 0.25;
     flow *= (cell.Height / ncell.Height) * flowConst;
     if ( flow < 0 ) flow = 0;
     cell.NewFluid -= flow;
     ncell.NewFluid += flow;
     if ( cell.NewFluid < 0 ) cell.NewFluid = 0;
}
else if ( ( ncell.Height > cell.Height ) &&
     ( cell.Fluid > (cell.material.maxFluid * (ncell.Height / cell.Height) ) ) {
     flow = (cell.Fluid - ncell.Fluid) * 0.25;
     flow *= (cell.Height / ncell.Height) * flowUpConst;
     if ( flow < 0 ) flow = 0;
     cell.NewFluid -= flow;
     ncell.NewFluid += flow;
     if ( cell.NewFluid < 0 ) cell.NewFluid = 0;
}
else if ( ( ncell.Height == cell.Height ) &&
     ( cell.Fluid > cell.material.maxFluid ) ) {
     flow = (cell.Fluid - ncell.Fluid) * 0.25;
     if ( flow < 0 ) flow = 0;
     cell.NewFluid -= flow;
     ncell.NewFluid += flow;
     if ( cell.NewFluid < 0 ) cell.NewFluid = 0;
}
```

ภาพที่ 25: กฎการถ่ายเทน้ำระหว่างเซลล์

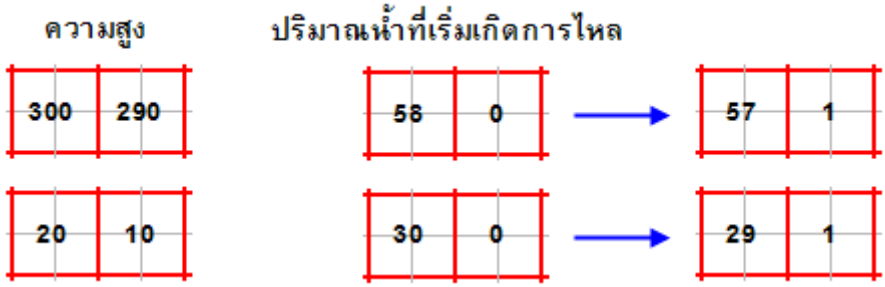
ตัวอย่างเช่น สำหรับคู่เซลล์ที่มีความสูงมากกว่า เช่น 290 หน่วยกับ 300 หน่วย เมื่อเทียบกับคู่เซลล์ที่มีความสูงต่ำกว่า เช่น 10 หน่วยกับ 20 หน่วย แม้ว่าส่วนต่างของความสูงจะมีค่าเป็น 10 หน่วยเท่ากัน แต่ความสามารถในการไหลของน้ำและอัตราการไหลของน้ำจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนี้

- ในกรณีที่เป็นการไหลจากตำแหน่งที่สูงกว่าไปยังตำแหน่งที่ต่ำกว่า จะมีอัตราส่วนระหว่างความสูงสำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขการไหลของน้ำเป็น 290/300 และ 10/20 ตามลำดับ ซึ่งทำให้การถ่ายเทระหว่างคู่เซลล์ที่มีความสูงต่ำกว่าเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า และมีอัตราส่วนระหว่างความสูงสำหรับการคำนวณปริมาณน้ำที่เกิดการถ่ายเทเป็น 300/290 และ 20/10 ตามลำดับ ทำให้ปริมาณน้ำที่เกิดการถ่ายเทระหว่างคู่เซลล์ที่มีความสูงต่ำกว่ามีปริมาณมากกว่าที่ปริมาณน้ำตั้งต้นเท่ากัน ดังตัวอย่างในภาพที่ 26

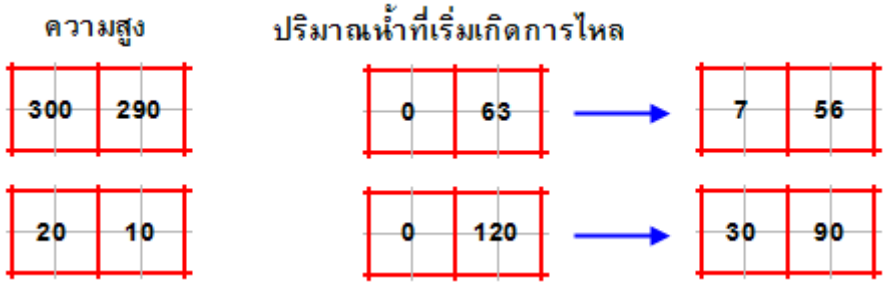
- ในกรณีที่เป็นการไหลจากตำแหน่งที่ต่ำกว่าไปยังตำแหน่งที่สูงกว่า จะมีอัตราส่วนระหว่างความสูงสำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขการไหลของน้ำเป็น 300/290 และ 20/10 ตามลำดับ ซึ่งทำให้การถ่ายเทระหว่างคู่เซลล์ที่มีความสูง

มากกว่าเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า และมีอัตราส่วนระหว่างความสูงสำหรับการคำนวณปริมาณน้ำที่เกิดการถ่ายเทเป็น 290/300 และ 10/20 ตามลำดับ ทำให้ปริมาณน้ำที่เกิดการถ่ายเทระหว่างคู่เซลล์ที่มีความสูงมากกว่ามีปริมาณมากกว่าที่ปริมาณน้ำตั้งต้นเท่ากัน ดังตัวอย่างในภาพที่ 27

- ในกรณีที่เป็นการไหลระหว่างเซลล์ที่มีความสูงเท่ากัน ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเซลล์จะต้องมีค่ามากกว่าค่าความจุน้ำของพื้นที่ คือ 60 หน่วยก่อนจึงจะสามารถเกิดการถ่ายเทไปยังเซลล์ข้างเคียงได้



ภาพที่ 26: ตัวอย่างการไหลของน้ำจากตำแหน่งที่สูงกว่าไปยังตำแหน่งที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 27: ตัวอย่างการไหลของน้ำจากตำแหน่งที่ต่ำกว่าไปยังตำแหน่งที่สูงกว่า

นอกจากนั้น ปริมาณน้ำที่เกิดการถ่ายเทระหว่างเซลล์จะคิดเป็นสัดส่วนจากปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเซลล์ในขณะหนึ่งๆ ทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลไปถึงเซลล์ที่อยู่เป็นระยะทางห่างออกไปมีค่าลดลงเรื่อยๆ อย่างรวดเร็ว ซึ่งเมื่อรวมกับเงื่อนไขของการถ่ายเทน้ำระหว่างเซลล์ที่ปริมาณน้ำในเซลล์จะต้องมีค่ามากกว่าค่าความจุน้ำระหว่างเซลล์ที่ได้จากการนำค่าความจุน้ำของเซลล์คูณด้วยอัตราส่วนระหว่างความสูง ทำให้ระยะทางของการไหลสูงสุดที่เป็นไปได้ภายในระยะเวลา 50 หน่วยมีระยะทางเพียง 8 เซลล์เท่านั้น

สำหรับวิธีการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของตารางเวลาและวิธีการตรวจสอบความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ของงานวิจัยของ Kotrajaras และ Kumnoonsate นั้น ตารางเวลาของ

เซลล์กลุ่มที่อยู่บนเส้นทางระหว่างจุดควบคุมจะใช้การประมาณค่าโดยอ้างอิงจากระยะเวลาที่กำหนดระหว่างจุดควบคุมสองจุด โดยสมมติให้พฤติกรรมของเซลล์สามารถแพร่กระจายให้กับเซลล์ข้างเคียงได้เสมอในหนึ่งหน่วยเวลา เช่น ถ้าหากในเวลาปัจจุบันเซลล์หนึ่งมีการไหม้ของไฟอยู่ ด้วยวิธีการประมาณค่าตามงานวิจัยของ Kotrajaras และ Kumnoonsate จะถือว่าในเวลาต่อไปเซลล์ข้างเคียงที่ติดกับเซลล์นี้จะเกิดการไหม้ของไฟในหน่วยเวลาถัดไปเสมอถ้าหากยังสามารถเกิดการไหม้ของไฟได้ แต่ในการทำงานจริงโดยใช้กฎการเปลี่ยนสถานะของระบบ EmerGEnt นั้น พฤติกรรมต่างๆ ของเซลล์ไม่สามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วตามที่คาดหมายไว้ ทำให้คุณภาพของผลการค้นหาที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้จริงมีค่าน้อยกว่าร้อยละร้อย เพราะเหตุการณ์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงตามตารางเวลาที่ประมาณค่าเอาไว้ นอกจากนั้นเหตุการณ์บางเหตุการณ์ที่ผ่านการตรวจสอบและถูกคำนวณว่าเกิดขึ้นได้ก็อาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงด้วยสาเหตุที่พฤติกรรมของเซลล์ไม่สามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วตามที่ประมาณไว้ เช่น ในการไหลของน้ำ ระยะทางการไหลสูงสุดที่เป็นไปได้จริงในระยะเวลา 50 หน่วยเวลาคือ 8 เซลล์ แต่ในการสร้างตารางเวลาและการตรวจสอบนั้น จะมองว่าถ้าหากจำนวนช่องที่เป็นระยะห่างมีจำนวนไม่เกินระยะห่างของเวลาแล้วเหตุการณ์นั้นก็สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในระดับตัวอย่างทดสอบโดยตรง ทำให้แม้จะทำการค้นหามากเพียงใด ก็ไม่สามารถทำให้เหตุการณ์เป้าหมายที่ต้องการนั้นเกิดขึ้นได้จริง

งานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรมนี้เป็นต้นแบบในการพัฒนาขยายผลต่อไป เพื่อให้สามารถทำงานกับแผนที่ที่มีความละเอียดสูงขึ้นได้โดยมีคุณภาพของผลลัพธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยจะนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเข้ามาร่วมเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลลัพธ์จากการค้นหาให้ดียิ่งขึ้น และนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพเข้ามาใช้เพื่อลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหาลง

2.2.2 งานวิจัยด้านการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในงานที่คล้ายกับงานวิจัยนี้

Babbar, M., Minsker, B. [11] (A Multiscale Master-Slave Parallel Genetic Algorithm with Application to Groundwater Remediation Design.) ได้ออกแบบระบบเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำบาดาลโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อค้นหาตำแหน่งสำหรับทำการขุดบ่อ อัตราการถ่ายเทน้ำของบ่อ และลักษณะของบ่อ โดยให้เป็นบ่อสำหรับสูบน้ำออกหรือเป็นบ่อสำหรับถ่ายน้ำเข้า ในการทดลองมีการแบ่งแบบจำลองเป็นสองส่วน ได้แก่ แบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Model) สำหรับการจำลองการไหลของน้ำบาดาลและการถ่ายเทของสารพิษ ซึ่งทำการแบ่งพื้นที่ที่สนใจออกเป็นตาราง (Grid) ที่มีความละเอียดสองระดับคือ กว้างแปดหน่วยและยาวสิบหกหน่วย กับกว้างยี่สิบสี่หน่วยและยาวสี่สิบแปดหน่วย และแบบจำลองในการหาทางเลือกที่ดีที่สุด (Optimization Model) สำหรับการค้นหาคำตอบเพื่อลดต้นทุนในการบำบัด

ให้เหลือน้อยที่สุด การทำงานของระบบจะเริ่มทำการค้นหาบนตารางที่มีระดับความละเอียดต่ำกว่าเป็นจำนวนรุ่นหนึ่งๆ แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเป็นส่วนหนึ่งของประชากรตั้งต้นบนตารางที่มีระดับความละเอียดสูงขึ้น โดยในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการค้นหาบนตารางที่มีระดับความละเอียดต่ำเป็นจำนวน 0, 20, 40 และ 60 รุ่นแล้วนำแต่ละผลลัพธ์ที่ได้มาใช้เป็นประชากรตั้งต้นในการค้นหาบนตารางที่มีระดับความละเอียดสูง ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการค้นหาบนตารางที่มีระดับความละเอียดต่ำเป็นจำนวนรุ่นมากขึ้น จะทำให้ผลลัพธ์สุดท้ายมีคุณภาพแย่ลงเล็กน้อยคือร้อยละสอง แต่สามารถประหยัดเวลาในการค้นหาลงเหลือเพียงหนึ่งในสามของการคำนวณบนตารางที่มีระดับความละเอียดสูงเพียงอย่างเดียว งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดสามารถลดเวลาในการทำงานลงได้อย่างมาก ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้มีคุณภาพแย่ลงเล็กน้อย

งานวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้มุ่งเน้นไปที่การค้นหาที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ซึ่งไม่สูงมากนักโดยใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก แนวทางของงานวิจัยนี้จึงสามารถนำมาใช้ในการดำเนินงานต่อไปได้ โดยจะทำการทดลองกำหนดจำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดต่ำเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน แล้วนำผลการค้นหาที่ได้มาทำการเพิ่มระดับความละเอียดเพื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดที่สูงขึ้น แล้วเปรียบเทียบคุณภาพสุดท้ายของผลการค้นหาที่ได้จากการค้นหาที่ระดับความละเอียดสูงสุดหรือก็คือระดับความละเอียดเดียวกับระดับความละเอียดของแผนที่เป้าหมายที่ถูกกำหนดไว้

Pan และคณะ [12] (2D Multi-Scale Hybrid Optimization Method for Geophysical Inversion and Its Application.) ได้คิดวิธีการคำนวณย้อนกลับด้านธรณีฟิสิกส์โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Genetic Algorithm) ร่วมกับซิมเพล็กซ์อัลกอริทึม (Simplex Algorithm) และทำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด โดยในส่วนของการจำลองการอบเหนียวได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าความเหมาะสมและการสร้างประชากรใหม่ในส่วนของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ขั้นตอนในการค้นหาผลลัพธ์ จะทำการค้นหาโดยเริ่มจากการค้นหาบนตารางของสนามความเร็ว (Velocity field) ที่มีความละเอียดต่ำแล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณบนตารางที่มีความละเอียดสูงขึ้นต่อไปโดยใช้ไบ-คิวบิกสไปลน์อินเตอร์โพเลชัน (Bi-Cubic Spline Interpolation) ในการประมาณค่า ในการค้นหาบนแต่ละระดับความละเอียด จะทำการค้นหาโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมก่อน แล้วจึงนำผลการค้นหาไปทำการปรับต่อด้วยซิมเพล็กซ์อัลกอริทึม โดยการทดสอบได้ทำทั้งกับข้อมูลสังเคราะห์และกับข้อมูลจริง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่ใช้ทำให้สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้โดยใช้เวลาน้อยลง

ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะไม่มีการใช้งานเซลลูลาร์ ออโตมาตา แต่รูปแบบในการค้นหาเพื่อกำหนดค่าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมให้กับแต่ละตำแหน่งบนตารางมีความ

คล้ายคลึงกับงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงสามารถนำมาปรับใช้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าจากผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาบนตารางที่มีระดับความละเอียดต่ำให้กับประชากรเริ่มต้นสำหรับตารางที่มีระดับความละเอียดสูงขึ้น โดยจะนำวิธีการประมาณค่าเพื่อเพิ่มระดับความละเอียดหลายๆ แบบมาใช้ เช่น ไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน เป็นต้น แล้วดูว่าค่าเฉลี่ยของคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งจะอยู่ในรูปของร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง ต่อเหตุการณ์ที่โปรแกรมกำหนดให้นั้นเป็นอย่างไรแล้วทำการเลือกวิธีการประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้

บทที่ 3
การนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้เพื่อลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหา

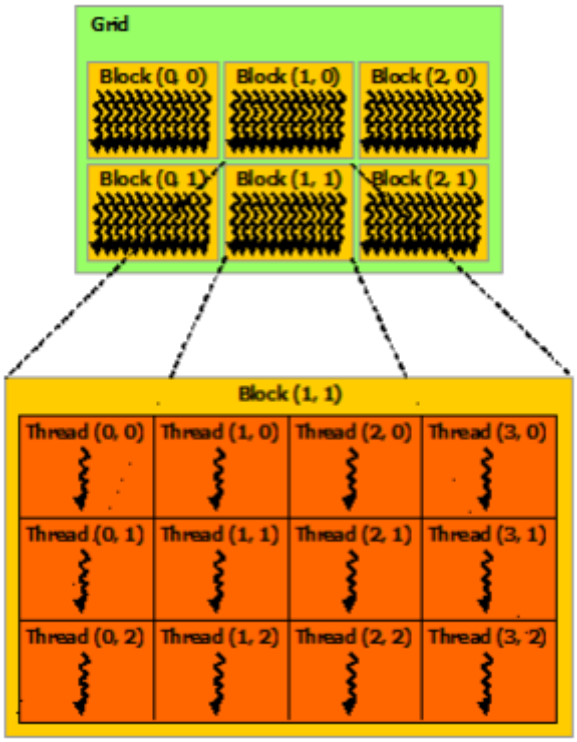
งานวิจัยนี้ต้องการทำการค้นหาเพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองบนแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เนื่องจากการคำนวณบนหน่วยประมวลกลางเพียงอย่างเดียวนั้นต้องใช้เวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก ดังนั้น เพื่อเป็นการลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหา งานวิจัยนี้จึงจะนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้

3.1 การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ

ในปัจจุบัน หน่วยประมวลผลภาพได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในการคำนวณแบบทั่วไปมากขึ้น แทนที่จะใช้ในการคำนวณผลด้านภาพเพียงอย่างเดียว โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้หน่วยประมวลผลภาพของบริษัทเอ็นวีเดีย(Nvidia) [13] ซึ่งมีชื่อเรียกสถาปัตยกรรมการประมวลผลแบบขนาน คือ คูดา (CUDA, Compute Unified Device Architecture) [14] ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันได้กับภาษาซี (C) [15] โดยมีชุดคำสั่งเฉพาะสำหรับการเรียกใช้งาน

ในหน่วยประมวลผลภาพนั้น จะประกอบไปด้วยชุดของสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์(Streaming Multiprocessor) [16] โดยสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์แต่ละตัวจะประกอบด้วยหน่วยประมวลผลย่อยอีกจำนวนหนึ่ง ซึ่งการประมวลผลแบบขนานนั้นจะเกิดขึ้นภายในสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์แต่ละตัว โดยมีคำเรียกการประมวลผลบนหน่วยประมวลผลย่อยแต่ละตัวนี้ว่าเทรด(Thread)

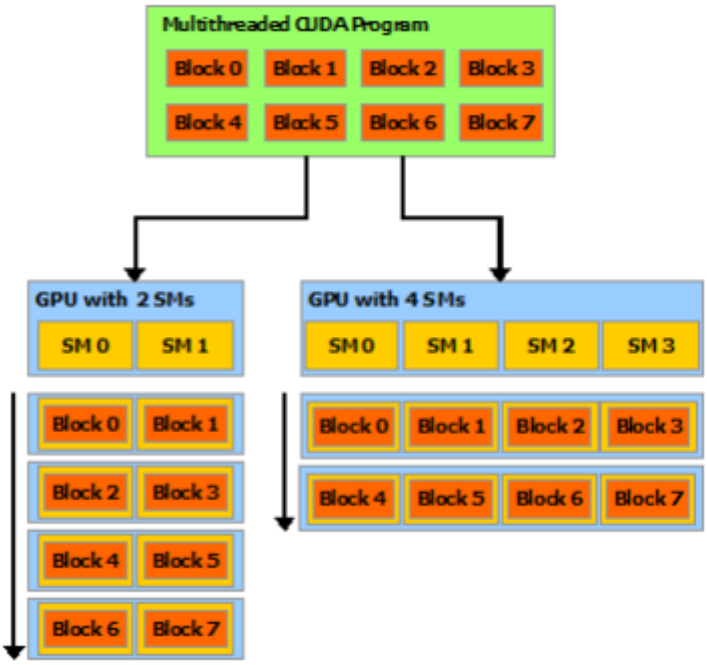
ในการเรียกใช้งานการประมวลผลแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพนั้นจะต้องทำการกำหนดโครงสร้างตามลำดับชั้นของเทรดเสียก่อน โดยลำดับของโครงสร้างแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ กริด(Grid), บล็อค(Block) และเทรด(Thread) โดยกริดจะประกอบด้วยบล็อคซึ่งสามารถทำการจัดเรียงได้ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ และในแต่ละบล็อคจะประกอบด้วยเทรดซึ่งสามารถทำการจัดเรียงได้ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ โดยมีการจัดเรียงตัวของเทรดในทุกบล็อคเหมือนกันทั้งหมด ดังตัวอย่างในภาพที่ 28



ภาพที่ 28: ลำดับโครงสร้างของเทรด

เมื่อทำการกำหนดโครงสร้างของลำดับชั้นของเทรดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เทรดจะถูกทำการประมวลผลบนหน่วยประมวลผลภาพ โดยแต่ละบล็อคจะถูกส่งไปยังสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์แต่ละตัว โดยมีข้อกำหนดว่าแต่ละบล็อคนั้นจะถูกกำหนดให้กับสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์เพียงตัวเดียวเท่านั้น แต่ว่าสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์แต่ละตัวสามารถทำการประมวลผลหลายๆ บล็อคต่อเนื่องกันไปได้ ดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งทรัพยากรของสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์แต่ละตัวนั้นมีจำกัด ถ้าหากว่าในแต่ละบล็อคของเทรดมีความต้องการใช้งานทรัพยากรของสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์เกินกว่าปริมาณทรัพยากรสูงสุดที่สตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์มีอยู่ การประมวลผลแบบขนานนั้นก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เพราะไม่สามารถทำการประมวลผลได้แม้แต่บล็อคเดียว โดยทรัพยากรเฉพาะของแต่ละสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์ได้แก่ จำนวนรีจิสเตอร์(Register), หน่วยความจำเฉพาะที่(Local memory), หน่วยความจำร่วม (Shared memory)

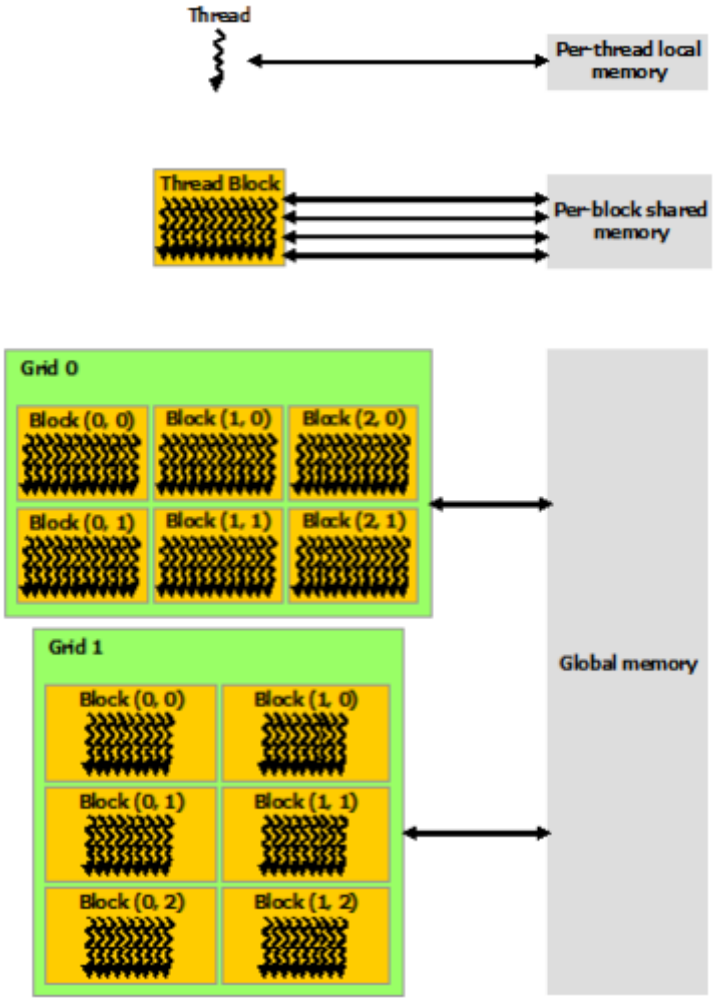
ในการประมวลผลสำหรับแต่ละบล็อคนั้น กลุ่มของเทรดที่อยู่ต่อเนื่องกันจะถูกจัดเป็นชุด ชุดละ 32 เทรด เพื่อนำไปทำการประมวลผล โดยมีชื่อเรียกชุดของเทรดนี้ คือ วอร์ป (Warp) ซึ่งในแต่ละรอบของการประมวลผลแบบขนานบนสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์ก็จะกระทำบนวอร์ปนี้เอง



ภาพที่ 29: ตัวอย่างการส่งบล็อคไปทำการประมวลผลบนสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์

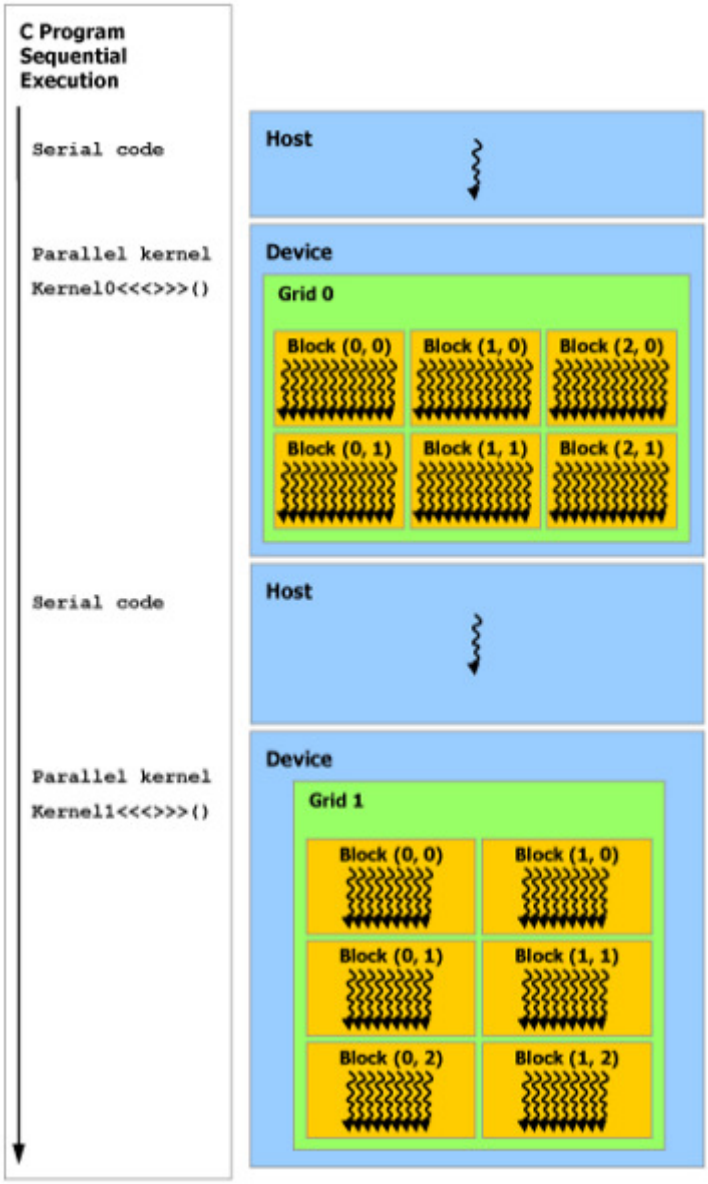
หน่วยความจำแต่ละแบบที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลนั้นก็จะมีระดับในการเข้าถึงแตกต่างกันไป ดังแสดงในภาพที่ 30 โดยสามารถอธิบายโดยย่อได้ดังนี้

- ในระดับของเทรด จะมีหน่วยความจำเฉพาะที่(Local memory)ของเทรดนั้นๆ เอง
- ในระดับของบล็อค จะมีหน่วยความจำร่วม(Shared memory) ซึ่งทุกเทรดในบล็อคนั้นๆ สามารถทำการเข้าถึงได้ การเข้าถึงหน่วยความจำร่วมจะใช้เวลาน้อยกว่าการเข้าถึงหน่วยความจำในระดับของกริดเป็นอย่างมาก
- ในระดับของกริด จะมีหน่วยความจำกลาง(Global memory), หน่วยความจำค่าคงที่(Constant memory) และหน่วยความจำเท็กซ์เจอร์(Texture memory) ซึ่งทุกบล็อคและทุกเทรดสามารถทำการเข้าถึงได้



ภาพที่ 30: ลำดับโครงสร้างของหน่วยความจำบนหน่วยประมวลผลภาพ

นอกจากนั้น จากการที่หน่วยประมวลผลภาพนั้นมีทรัพยากรต่างๆ เช่น หน่วยประมวลผล และหน่วยความจำต่างๆ เป็นของตัวเอง การจัดการกับทรัพยากรต่างๆ จึงถูกแยกออกจากหน่วยประมวลผลกลางเหมือนเป็นอีกระบบหนึ่ง ดังตัวอย่างในภาพที่ 31 โดยการจัดการกับหน่วยความจำบนหน่วยประมวลผลภาพและการโอนย้ายข้อมูลระหว่างหน่วยประมวลผลภาพกับหน่วยประมวลผลกลาง จะต้องกระทำผ่านชุดคำสั่งเฉพาะเท่านั้น



ภาพที่ 31: ตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมที่มีการใช้งานทั้งหน่วยประมวลผลกลางและหน่วยประมวลผลภาพ

3.2 การนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้งาน

การคำนวณต่างๆ ในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ การคำนวณสำหรับการจำลองสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง และการคำนวณสำหรับการทำการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งการนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้งานก็สามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ส่วนตามเป้าหมายของการคำนวณด้วยเช่นกัน

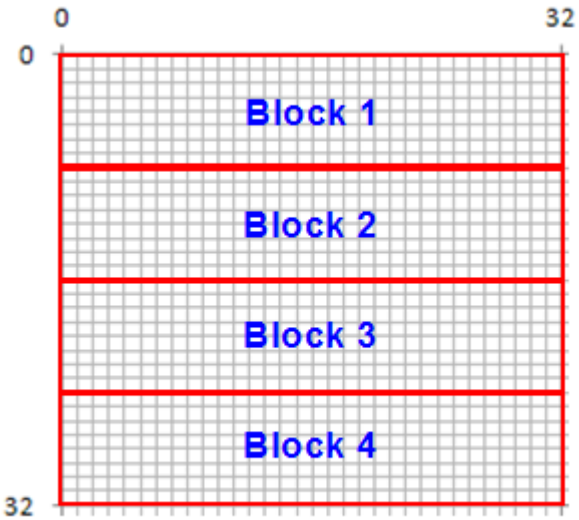
3.2.1 การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพสำหรับการจำลองสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง

ในการนำการคำนวณแบบขนานมาใช้เพื่อทำการจำลองสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองที่ใช้การคำนวณเซลลูลาร์ ออโตมาตาตามระบบ EmerGEnT นั้น สามารถทำได้โดยการกำหนดให้แต่ละเทรดรับผิดชอบการคำนวณต่างๆ ของเซลล์บนเซลลูลาร์ ออโตมาตาแต่ละเซลล์ โดยทำการจับคู่กัน 1 เทรดต่อ 1 เซลล์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดโครงสร้างตามลำดับชั้นของเทรด ดังนี้

- โครงสร้างของกริด ทำการจัดเรียงบล็อคภายในกริดเป็นแบบ 2 มิติเพื่อความสะดวกในการจัดการ โดยกำหนดให้ขอบเขตพื้นที่ที่แต่ละบล็อคครอบคลุมไม่มีการทับซ้อนกัน

- โครงสร้างของบล็อค ทำการจัดเรียงเทรดภายในบล็อคเป็นแบบ 2 มิติเพื่อความสะดวกในการจัดการ โดยกำหนดให้แต่ละเทรดทำการรับผิดชอบการคำนวณของแต่ละเซลล์ในขอบเขตพื้นที่ที่บล็อคนั้นรับผิดชอบ โดยให้แต่ละบล็อคมีจำนวนเทรดในด้านกว้างเท่ากับความกว้างของแผนที่ เพื่อลดจำนวนรอยต่อระหว่างบล็อคเพื่อให้ใช้งานหน่วยความจำร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สำหรับแผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์ จะสามารถทำการกำหนดโครงสร้างได้เป็นดังในภาพที่ 32 โดยให้แต่ละบล็อคกว้าง 32 เทรดและสูง 8 เทรด



ภาพที่ 32: ตัวอย่างการกำหนดโครงสร้างของเทรดสำหรับแผนที่ขนาด 32x32 เซลล์

และสำหรับแผนที่ขนาดกว้าง 16 เซลล์ ยาว 16 เซลล์ จะทำการกำหนดโครงสร้างโดยให้แต่ละบล็อคกว้าง 16 เทรดและสูง 16 เทรด จึงใช้เพียง 1 บล็อคต่อการคำนวณ

แต่ด้วยข้อจำกัดทางด้านการเข้าถึงหน่วยความจำ จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนวิธีการเก็บข้อมูลของค่าสมบัติของเซลล์จากเดิมที่ใช้อะเรย์(Array) 2 มิติในการจัดเก็บมาใช้อะเรย์ 1 มิติแทน โดยมีวิธีการแปลงค่าดัชนี(Index)ของเซลล์จากค่าดัชนีของอะเรย์ 2 มิติมาเป็นค่าดัชนีของอะเรย์ 1 มิติตามสมการ (8) โดยค่าดัชนีแรกเริ่มต้นที่ 0

$$Index1D = (Index2D.y * Array.Width) + Index2D.x \quad (8)$$

และการหาค่าดัชนีของเซลล์ที่เทรดหนึ่งๆ ทำการรับผิดชอบการคำนวณสามารถทำได้โดยใช้สมการ (9) โดยค่าดัชนีแรกเริ่มต้นที่ 0

$$Index1D = (BlockId.y * (Block.Width * Block.Height)) + (ThreadId.y * Block.Width) + ThreadId.x \quad (9)$$

ซึ่งเมื่อแต่ละเทรดทำการคำนวณหาค่าดัชนีของเซลล์ที่ตนเองต้องทำการคำนวณเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการอ่านค่าสมบัติต่างๆ ของเซลล์ที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลองเหตุการณ์ที่สนใจจากหน่วยความจำกลางมาเก็บไว้ที่หน่วยความจำเฉพาะที่หรือหน่วยความจำร่วมเพื่อใช้ในการคำนวณเพื่อจำลองเหตุการณ์ต่อไป ซึ่งค่าที่จะถูกอ้างถึงโดยเซลล์เพื่อนบ้านจะถูกนำไปเก็บไว้ที่หน่วยความจำร่วมเพื่อให้สามารถทำการเข้าถึงได้อย่างรวดเร็ว รายละเอียดของการเก็บค่าคุณสมบัติต่างๆ สามารถแจกแจงได้ดังที่แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3: ตารางแสดงประเภทของเหตุการณ์ ค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องและประเภทของหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บ

ประเภทของเหตุการณ์	ค่าคุณสมบัติ	ประเภทของหน่วยความจำ
น้ำ	ความสูง	หน่วยความจำร่วม
น้ำ	ปริมาณน้ำ	หน่วยความจำร่วม
ไฟ	อุณหภูมิ	หน่วยความจำร่วม
ไฟ	มวล	หน่วยความจำร่วม
ไฟ	ความเสียหาย	หน่วยความจำเฉพาะที่
ไฟ	ความชื้น	หน่วยความจำเฉพาะที่
ไฟ	ลักษณะของพื้นที่	หน่วยความจำร่วม
ไฟ	ค่าการเผาไหม้	หน่วยความจำเฉพาะที่

3.2.2 การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพสำหรับการทำการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพเพื่อทำการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น จะถูกนำมาใช้กับการคำนวณ 3 ส่วน ได้แก่ การกลายพันธุ์ และการไขว้เปลี่ยน และการคำนวณหาค่าความเหมาะสมของโครโมโซม

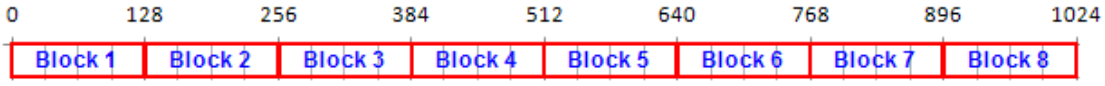
สำหรับการนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้กับการกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนนั้น เนื่องจากวิธีการที่ใช้ในโปรแกรมเดิมนั้นได้ทำการเก็บค่าของโครโมโซมในรูปแบบของอะเรย์ 1 มิติอยู่แล้วโดยใช้วิธีการแปลงค่าดัชนีตามสมการ (8) โดยยีนแต่ละตัวเป็นตัวแทนของเซลล์ 1 เซลล์ ดังนั้นสำหรับวิธีการเก็บข้อมูลในขั้นตอนนี้จึงไม่จำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนใดๆ

ในด้านของการคำนวณนั้น จะกำหนดให้แต่ละเทรดทำการรับผิดชอบการคำนวณของยีน 1 ตัว โดยมีการกำหนดโครงสร้างตามลำดับชั้นของเทรด ดังนี้

- โครงสร้างของกริด ทำการจัดเรียงบล็อคภายในกริดเป็นแบบ 1 มิติเพื่อความสะดวกในการจัดการ เนื่องจากข้อมูลถูกจัดเก็บอยู่ในรูปของอะเรย์ 1 มิติ

- โครงสร้างของบล็อค ทำการจัดเรียงเทรดภายในบล็อคเป็นแบบ 1 มิติเพื่อความสะดวกในการจัดการ โดยกำหนดให้แต่ละเทรดทำการรับผิดชอบการคำนวณของแต่ละยีนในช่วงที่บล็อคนั้นรับผิดชอบ โดยพยายามกำหนดให้บล็อคมีขนาดไม่ใหญ่เกินไป เพื่อกระจายการคำนวณออกเป็นหลายบล็อค เพื่อให้สามารถทำการคำนวณกับหลายๆ ส่วนของโครโมโซมไปได้พร้อมๆ กัน เนื่องจากแต่ละบล็อคจะถูกส่งไปประมวลผลแบบขนานบนสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์แต่ละตัว ซึ่งเมื่อมีจำนวนบล็อคเพิ่มขึ้น ถ้าหากสตรีมมิงมัลติโปรเซสเซอร์มีจำนวนเพียงพอ ก็จะสามารถทำการคำนวณหลายๆ บล็อคได้พร้อมๆ กัน

สำหรับแผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์ ซึ่งมีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 1024 เซลล์นั้น สามารถทำการกำหนดโครงสร้างได้เป็นดังในภาพที่ 33 โดยให้แต่ละบล็อคกว้าง 128 เทรด และสำหรับแผนที่ขนาดกว้าง 16 เซลล์ ยาว 16 เซลล์ ซึ่งมีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 256 เซลล์นั้น ก็จะทำการกำหนดโครงสร้างโดยให้แต่ละบล็อคกว้าง 128 เทรดเช่นเดียวกัน โดยใช้เพียง 2 บล็อคในการคำนวณ



ภาพที่ 33: ตัวอย่างการกำหนดโครงสร้างของเทรดสำหรับการคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับแผนที่ขนาด 32x32 เซลล์

สำหรับการนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้กับการคำนวณหาค่าความเหมาะสมนั้น วิธีการที่ใช้ในโปรแกรมเดิมจะนำโครโมโซมที่ได้มาแปลงเป็นตารางของเซลล์หรือแผนที่สำหรับทำการจำลองสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง โดยทำการแปลงค่าดัชนีจากค่าดัชนีของอะเรย์ 1 มิติไปเป็นค่าดัชนีของอะเรย์ 2 มิติตามสมการ (10)

$$Index2D.x = Index1D \% Map.Width$$

$$Index2D.y = Index1D / Map.Width \quad (10)$$

หลังจากนั้นจึงนำตารางของเซลล์ที่ได้มาทำการจำลองสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองเพื่อทำการวัดค่าความเหมาะสมโดยทำการจำลองเหตุการณ์ทีละหนึ่งหน่วยเวลา แล้วทำการคิดค่าความเหมาะสมของแต่เซลล์แล้วนำมารวมกันเป็นค่าความเหมาะสมของโครโมโซม ในการคิดค่าความเหมาะสมของแต่ละเซลล์นั้นจะคิดจากการที่เซลล์นั้นๆ มี

เหตุการณ์ที่สนใจเกิดขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามีเหตุการณ์ที่สนใจเกิดขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด ก็จะได้รับค่าความเหมาะสมเพิ่ม ในทางกลับกัน ถ้าหากมีเหตุการณ์เกิดขึ้นภายนอกช่วงเวลาที่กำหนดไว้ ก็จะถูกลดค่าความเหมาะสมลง ในงานวิจัยนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการคิดคะแนนแบบเดิมที่ใช้ในโปรแกรม และการนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้นั้น สามารถทำได้โดยการกำหนดให้แต่ละเทรดรับผิดชอบการคำนวณต่างๆ ของเซลล์บนเซลลูลาร์ ออโตมาตาแต่ละเซลล์ โดยทำการจับคู่กัน 1 เทรดต่อ 1 เซลล์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดโครงสร้างตามลำดับชั้นของเทรดแบบเดียวกันกับในข้อ 3.2.1

บทที่ 4

การปรับปรุงพัฒนาการทำงานของโปรแกรม

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมจากงานวิจัยเดิมให้สามารถรองรับการทำงานกับแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่วิธีการคำนวณต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรมเดิมนั้นยังคงมีปัญหาในหลายๆ จุด จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงแก้ไข รวมทั้งเพิ่มการทำงานอื่นๆ เข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยมีสิ่งที่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงแก้ไข ได้แก่ กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ของระบบ EmerGEnt และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับค่าสมบัติลักษณะของพื้นที่ของเซลล์ และมีสิ่งที่เพิ่มเข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ได้แก่ การใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดในการค้นหาผลลัพธ์

4.1 การปรับปรุงกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ของระบบ EmerGEnt

เนื่องจากกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ของระบบ EmerGEnt ที่ใช้ในโปรแกรมนั้นมีความบกพร่อง ในงานวิจัยนี้จึงขอเสนอกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุง ได้แก่ กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการถ่ายเทความร้อน กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์ และกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการไหลของน้ำ ดังนี้

4.1.1 กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการถ่ายเทความร้อน

สำหรับกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการถ่ายเทความร้อนนั้น ปัญหาที่พบในกฎเดิมคือ การถ่ายเทความร้อนและการลามของไฟในทิศทางต่างๆ เป็นไปอย่างไม่เท่าเทียมกัน โดยในบางทิศทางจะมีการถ่ายเทความร้อนไปได้น้อยกว่า รวมถึงปัญหาการเกิด Oscillation ในระบบ นอกจากนั้น ด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อนเดิม เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นปริมาณพลังงานที่ส่งถ่ายไปถึงก็จะลดลง ทำให้การลามของไฟที่ระยะทางไกลๆ เป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งค่อนข้างขัดกับความเป็นจริง ที่ไฟสามารถลามไปไกลได้ถ้ามีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาต่างๆ เหล่านี้ จึงขอเสนอกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการถ่ายเทความร้อนใหม่ ดังภาพที่ 34

```
HCCell      = cell.material.SHC * cell.Mass;
HCNeighbour = ncell.material.SHC * ncell.Mass;

if ( (cell.Temp < (cell.material.FlashPoint + (cell.material.MaxBurn * 0.5))) &&
       (ncell.Temp > ncell.material.FlashPoint) &&
       (ncell.Temp > cell.Temp) ) {
    cell.NewTemp += 0.5 * (ncell.material.FlashPoint * HCNeighbour) / HCCell;
}
```

ภาพที่ 34: กฎการถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์แบบใหม่

ในการทำงานของกฎการถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์แบบใหม่นี้ เซลล์จะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์ข้างเคียงมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดติดไฟและมีอุณหภูมิสูงกว่าเซลล์นั้นๆ โดยที่อุณหภูมิของเซลล์เองจะต้องมีค่าน้อยกว่าผลรวมของค่าที่จุดติดไฟกับครึ่งหนึ่งของค่าการเผาไหม้สูงสุด ด้วยวิธีนี้จึงสามารถแน่ใจได้ว่าเซลล์จะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนเซลล์มีอุณหภูมิถึงค่าค่าหนึ่งเท่านั้น และไม่มีการถ่ายเทความร้อนกลับไปกลับมาระหว่างคู่ของเซลล์ และการลามของไฟจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เพราะเมื่อเซลล์หนึ่งๆ มีอุณหภูมิสูงถึงระดับหนึ่ง เซลล์ที่อยู่รอบข้างที่ยังมีอุณหภูมิไม่ถึงระดับที่กำหนดก็จะมีพลังงานเพิ่มขึ้นและสามารถเกิดการเผาไหม้อย่างค่อนข้างแน่นอน โดยในการนำกฎการถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์แบบใหม่นี้ไปใช้ จะต้องทำการปรับค่าความจุความร้อนจำเพาะของลักษณะพื้นที่แบบน้ำจากที่มีค่าเท่ากับ 1 ในงานวิจัยเดิม เป็น 100 เท่ากับค่าความจุความร้อนจำเพาะของลักษณะพื้นที่แบบอื่นๆ เพื่อป้องกันไม่ให้พื้นที่แบบน้ำมีอุณหภูมิสูงผิดปกติ

4.1.2 กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์

สำหรับกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์นั้น กฎเดิมที่ใช้ในโปรแกรมมีจุดบกพร่อง คือ การคำนวณค่าความเสียหายก่อนการคำนวณค่าการเผาไหม้ แต่เนื่องจากค่าการเผาไหม้จะถูกลดทอนโดยค่าความเสียหายของเซลล์ ลำดับการคำนวณดังกล่าวจึงสามารถก่อให้เกิดเหตุการณ์ที่เซลล์เกิดค่าความเสียหายจนเกินระดับค่าการเผาไหม้สูงสุดโดยไม่เกิดค่าการเผาไหม้ขึ้นเลยได้ถ้าหากเซลล์มีอุณหภูมิสูงขึ้นมากอย่างเฉียบพลัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงขอปรับแก้กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์ใหม่ ดังภาพที่ 35

```
Temp = cell.Temp - (cell.material.FlashPoint + cell.Wetness);
if ( Temp > (cell.material.MaxBurn * 2))
    Burn = cell.material.MaxBurn;
else if ( Temp > 0 )
    Burn = (1 - ((0.25 * Temp) / cell.material.MaxBurn) * Temp;
if ( Burn > cell.material.MaxBurn )
    Burn = cell.material.MaxBurn;
Burn -= cell.Damage;
if ( Burn < 1 )
    Burn = 0;
if ( Temp > 0 )
    cell.Damage += ((Temp * cell.material.BurnRate) - cell.Wetness) * burnConst;
cell.NewTemp += Burn * cell.material.BurnTemp;
cell.Burn = Burn;
```

ภาพที่ 35: กฎการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์แบบใหม่

ในการทำงานของกฎการคำนวณค่าความเสียหายและค่าการเผาไหม้ของเซลล์แบบใหม่นี้ ค่าการเผาไหม้จะถูกทำการคำนวณด้วยค่าความเสียหายเดิมของเซลล์ก่อนทำการปรับค่าใหม่ แล้วจึงทำการคำนวณปรับค่าความเสียหายของเซลล์หลังจากนั้น ด้วยวิธีนี้จึงสามารถแน่ใจได้ว่าในกรณีที่เซลล์มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเฉียบพลันจนสามารถทำให้เกิดค่าความเสียหายได้มากจนเท่ากับหรือมากกว่าระดับค่าการเผาไหม้สูงสุดของเซลล์ จะเกิดค่าการเผาไหม้ขึ้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 หน่วยเวลา

4.1.3 กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการไหลของน้ำ

สำหรับกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการไหลของน้ำนั้น กฎเดิมที่ใช้ในโปรแกรมมีจุดบกพร่องในแง่ของอัตราการถ่ายเทน้ำระหว่างเซลล์ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทน้ำระหว่างคู่เซลล์ที่มีส่วนต่างของความสูงเท่ากันแต่มีค่าความสูงต่างกัน มีอัตราการถ่ายเทน้ำไม่เท่ากัน และนอกจากนั้นการถ่ายเทน้ำยังเป็นไปได้ช้า เนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลต่อเนื่องตามเส้นทางไปมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะทางสูงสุดที่น้ำสามารถไหลไปได้ภายในระยะเวลา 50 หน่วยเวลานั้นมีระยะทางเพียง 8 เซลล์เท่านั้น ด้วยสาเหตุดังกล่าว จึงขอเสนอกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์สำหรับการถ่ายเทความร้อนใหม่ ดังภาพที่ 36

```
// Initialization when creating map
cell.isFluidIncrease = ENABLE;

// Fluid transfer function
For each ncell {
    if ( cell.Fluid == 0 )
        if ( ncell.Fluid > 0 &&
            (( ncell.Fluid + ncell.Height) >= cell.Height ) {
            cell.NewFluid += 15;
        }
    else if ( cell.Fluid > 0 ) {
        if ( ncell.Fluid == 0 ) {
            if ( ( cell.Fluid + cell.Height ) >= ncell.Height ) {
                // Stop increasing if flow path exists
                cell.isFluidIncrease = DISABLE;
            }
            else if ( cell.isFluidIncrease == ENABLE ) {
                // Cannot flow out, more fluid gathers
                cell.isFluidIncrease = ACTIVE;
            }
        }
    }
}

if ( all ncells already have fluid ) {
    cell.isFluidIncrease = DISABLE;
}

if ( cell.isFluidIncrease == ACTIVE ) {
    cell.NewFluid += 15;
}
```

ภาพที่ 36: กฎการคำนวณการไหลของน้ำของเซลล์แบบใหม่

ในการทำงานของกฎการไหลของน้ำแบบใหม่นี้ จะมีค่าสถานะเพิ่มขึ้นอีกอย่างหนึ่ง คือ สถานะการเพิ่มของน้ำ โดยค่านี้จะถูกกำหนดให้อยู่ในสถานะที่สามารถเพิ่มได้ในขณะที่เริ่มต้นทำการคำนวณสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเอง หลังจากนั้น ถ้าหากเซลล์ที่สนใจยังไม่มีน้ำ และมีเซลล์ข้างเคียงมีน้ำอยู่ และผลรวมของระดับความสูงของเซลล์ข้างเคียงนั้นกับปริมาณน้ำที่เซลล์ข้างเคียงนั้นมี มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระดับความสูงของเซลล์ที่สนใจ เซลล์ที่สนใจก็จะมีปริมาณน้ำในเซลล์เพิ่มขึ้น 15 หน่วยต่อทุกๆ เซลล์ข้างเคียงที่ผ่านเงื่อนไขดังกล่าว หลังจากนั้น เมื่อเซลล์ที่สนใจมีน้ำอยู่ในเซลล์แล้ว เซลล์ที่สนใจก็จะพยายามทำการถ่ายเทน้ำให้กับเซลล์ข้างเคียงอื่นๆ ต่อไป โดยถ้าหากสามารถทำการถ่ายเทไปยังเซลล์ใดเซลล์หนึ่งได้ ค่าสถานะการเพิ่มของน้ำก็จะถูกเปลี่ยนเป็นไม่มีการเพิ่ม แต่ถ้าหากว่ายังไม่สามารถทำการถ่ายเทไปยังเซลล์อื่นๆ ได้ ค่าสถานะนี้ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังเพิ่ม ซึ่งจะทำการเพิ่มค่าปริมาณน้ำในเซลล์ขึ้น 15

หน่วยหลังจากที่ได้พยายามตรวจสอบการถ่ายเทน้ำไปยังเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดแล้วและพบว่าไม่สามารถถ่ายเทไปยังเซลล์ใดๆ ได้ และในทางกลับกัน ถ้าหากเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดมีน้ำอยู่ทุกเซลล์แล้ว ค่าสถานะนี้ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นไม่มีการเพิ่ม เพราะไม่มีความจำเป็นต้องทำการถ่ายเทน้ำไปยังเซลล์อื่นๆ แล้ว ซึ่งด้วยวิธีการนี้ จะทำให้การถ่ายเทน้ำระหว่างเซลล์เป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและสามารถเกิดขึ้นได้เป็นระยะทางไกลเนื่องจากไม่ถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขปริมาณน้ำที่สามารถทำการถ่ายเทได้ และการไหลของน้ำสามารถเกิดขึ้นได้ตลอด

สาเหตุปริมาณน้ำในเซลล์เพิ่มขึ้นเป็นค่าคงที่และเซลล์ไม่มีการเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นอีกหากว่าเซลล์ข้างเคียงมีน้ำครบทุกเซลล์แล้วนั้นเป็นไปเพื่อป้องกันการเพิ่มของน้ำอย่างไร้ที่สิ้นสุดถ้าหากอนุญาตให้เซลล์มีการเพิ่มระดับน้ำขึ้นได้เรื่อยๆ ตราบเท่าที่ผลรวมระดับของความสูงของเซลล์ข้างเคียงกับปริมาณน้ำของเซลล์มีค่ามากกว่าผลรวมของระดับความสูงของเซลล์ที่สนใจกับปริมาณน้ำของเซลล์ที่สนใจ ซึ่งกรณีดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นสลับไปมาระหว่างเซลล์ได้ ซึ่งสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องไม่มีที่สิ้นสุด เนื่องจากการเพิ่มระดับน้ำของเซลล์นั้น ไม่มีการกำหนดปริมาณสูงสุดที่น้ำจะเพิ่มขึ้นได้เอาไว้ โดยสนใจเพียงแค่ว่าถ้าหากมีเส้นทางให้น้ำไหลมาถึงเซลล์หนึ่งๆ ได้แล้ว แต่ไม่มีเส้นทางให้น้ำไหลออกจากเซลล์นั้นไปยังเซลล์ข้างเคียงที่ยังไม่มีน้ำได้ ก็เท่ากับว่าจะมีน้ำไหลเข้ามาที่เซลล์นั้นเพิ่มขึ้นทุกหน่วยเวลาจนกระทั่งสามารถเกิดการไหลของน้ำไปยังเซลล์ข้างเคียงได้ เว้นแต่ว่าเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดจะมีน้ำอยู่ทุกเซลล์แล้วเท่านั้น

4.2 การปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

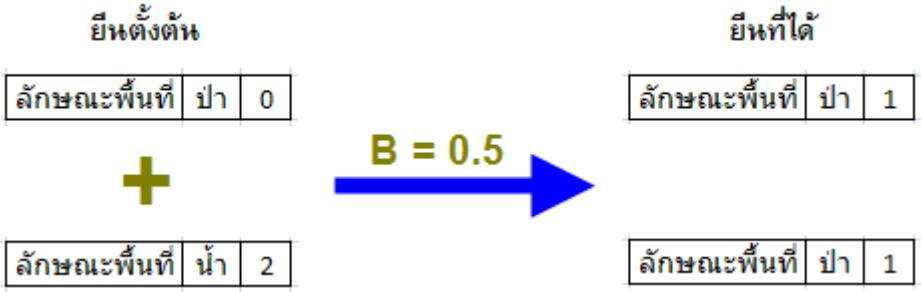
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยเดิมนั้น ในส่วนของการกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนสำหรับการค้นหาเพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟนั้นมีการทำการปรับเปลี่ยนค่าลักษณะของพื้นที่ของเซลล์ ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าลักษณะของพื้นที่ของเซลล์นั้นจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของระบบโดยตรง ซึ่งสามารถส่งผลให้เหตุการณ์สามารถเกิดขึ้นหรือไม่สามารถเกิดขึ้นเลยได้ เมื่อแผนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีจำนวนเซลล์ที่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์มากขึ้น จึงมีโอกาสเกิดการปรับค่าลักษณะของพื้นที่ของเซลล์กับเซลล์ในเส้นทางมากขึ้น ทำให้มีโอกาสสูงขึ้นที่โครโมโซมใหม่ที่ได้จะมีค่าความเหมาะสมลดลง งานวิจัยนี้จึงต้องการทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้กับการไม่ใช้การกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนเพื่อทำการปรับค่าลักษณะของพื้นที่

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในโปรแกรมของงานวิจัยเดิมนั้น จะเริ่มต้นด้วยการกำหนดให้ทุกเซลล์มีค่าลักษณะของพื้นที่เป็นหญ้า จากค่าลักษณะพื้นที่ทั้งหมดที่เป็นไปได้ 3 แบบ ได้แก่ หญ้า ป่า และน้ำ แล้วใช้การกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนเพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับค่าลักษณะของพื้นที่ สำหรับการกลายพันธุ์นั้น จะทำการสุ่มค่าลักษณะของ

พื้นที่ให้กับยีนใหม่ และสำหรับการไขว้เปลี่ยนนั้น เนื่องจากการไขว้เปลี่ยนทำโดยการถ่วงน้ำหนักของค่าของยีน 2 ยีนที่นำมาทำการไขว้เปลี่ยนกัน ตามสมการ (2) และสมการ (3) แล้วจึงนำค่าสุดท้ายที่ได้มาทำการปัดเศษเพื่อกำหนดลักษณะของพื้นที่ของเซลล์ตามตารางที่ 4 ทำให้ลักษณะของพื้นที่ที่ได้จากการไขว้เปลี่ยนนั้นอาจเป็นลักษณะของพื้นที่ที่ไม่ปรากฏในยีนทั้งคู่ที่นำมาทำการไขว้เปลี่ยนได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของการไขว้เปลี่ยนระหว่างยีนที่มีค่าลักษณะของพื้นที่เท่ากับ 0 และ 2 ซึ่งหมายถึงเซลล์จะมีลักษณะของพื้นที่เป็นหญ้าและน้ำตามลำดับ ค่าลักษณะของพื้นที่ที่ได้จากการไขว้เปลี่ยนอาจมีค่าเป็น 1 ซึ่งเป็นลักษณะของพื้นที่แบบป่าได้ ตามภาพที่ 37

ตารางที่ 4: ตารางแสดงค่าการกำหนดลักษณะของพื้นที่ตามค่าลักษณะของพื้นที่ของยีน

ค่าลักษณะของพื้นที่ของยีน	ลักษณะของพื้นที่จริง
1	ป่า
2	น้ำ
อื่นๆ	หญ้า



ภาพที่ 37: ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยนที่ทำให้เกิดปัญหา

ยีนที่ได้จากการกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนในลักษณะนี้ส่งผลให้โครโมโซมที่ได้มาใหม่นั้นมีความแตกต่างกับโครโมโซมที่นำมาทำการไขว้เปลี่ยนอย่างมาก ทำให้ค่าของยีนอื่นๆ ที่เป็นตัวแทนของเซลล์ข้างเคียงที่อาจเคยให้ผลลัพธ์ที่ดีในโครโมโซมต้นแบบให้ผลที่แย่ลงในโครโมโซมใหม่ เนื่องจากยีนของเซลล์ข้างเคียงนั้นเดิมถูกปรับค่าเพื่อให้เหมาะสมกับค่าลักษณะพื้นที่ตามปัจจุบันของเซลล์ที่สนใจ แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นการเปลี่ยนลักษณะของพื้นที่ที่แตกต่างออกไปโดยสิ้นเชิง ในงานวิจัยนี้จึงจะทำการทดลองเปรียบเทียบโดยตัดการกลายพันธุ์ออกโดยการสร้างประชากรใหม่ในส่วนที่เกิดจากการกลายพันธุ์เดิม ในงานวิจัยนี้จะทำการนำประชากรที่ถูกเลือกนั้นมาใช้เป็นประชากรใหม่โดยตรง และปรับแก้วิธีการไขว้เปลี่ยนในส่วนของลักษณะของพื้นที่ของเซลล์เป็นการสุ่มเลือกค่าลักษณะของพื้นที่จากของยีนใดยีน

หนึ่งมาโดยตรง แต่เนื่องจากการกลายพันธุ์นั้นถูกใช้เพื่อเพิ่มความหลากหลายของค่าลักษณะของพื้นที่โดยตรง จึงจำเป็นต้องมีการชดเชยความหลากหลายของค่าลักษณะของพื้นที่ให้กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยทำการสุ่มค่าลักษณะของพื้นที่ให้กับยีนในโครโมโซมในประชากรรุ่นแรกโดยตรงก่อนเริ่มดำเนินการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยค่าน้ำหนักสำหรับการสุ่มค่าลักษณะของพื้นที่แต่ละแบบนั้นอ้างอิงจากอัตราการกลายพันธุ์เดิมที่ร้อยละ 20 เมื่อค่าลักษณะของพื้นที่ในประชากรรุ่นแรกเป็นแบบหญ้าทั้งหมด ซึ่งค่าน้ำหนักสำหรับการสุ่มค่าลักษณะของพื้นที่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5: ตารางแสดงค่าน้ำหนักสำหรับการสุ่มค่าลักษณะของพื้นที่

ค่าลักษณะของพื้นที่ของยีน	ค่าน้ำหนัก(ร้อยละ)
หญ้า	86
ป่า	7
น้ำ	7

ในงานวิจัยนี้ จะทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบเดิม กับการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ถูกปรับแก้ แล้วเลือกวิธีที่ได้ผลลัพธ์ดีกว่ามาใช้ทำการทดลองต่อไป

4.3 การใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

การนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดมาใช้ในงานวิจัยนี้นั้น จะนำมาใช้เพื่อทำการค้นหาผลลัพธ์ที่ดีบนแผนที่ที่ระดับความละเอียดต่ำก่อน หลังจากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการเพิ่มระดับความละเอียดแล้วใช้เป็นส่วนหนึ่งของประชากรตั้งต้นในการค้นหาสำหรับแผนที่ที่ระดับความละเอียดสูงขึ้น จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ของการค้นหาของแผนที่ที่มีระดับความละเอียดเท่ากับระดับความละเอียดของแผนที่เป้าหมาย โดยสำหรับงานวิจัยนี้ที่นำการค้นหาด้วยวิธีที่ใช้ในโปรแกรมเดิมมาปรับปรุง จะใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเพียง 2 ระดับ คือ การคำนวณที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่เท่ากับระดับความละเอียดของแผนที่ และการคำนวณที่ระดับความละเอียดที่ครึ่งหนึ่งของระดับความละเอียดของแผนที่ โดยก่อนที่จะเริ่มทำการคำนวณที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งได้นั้น จะต้องเริ่มจากการลดระดับความละเอียดของสิ่งที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความเหมาะสมในการค้นหาก่อน ได้แก่

- ตารางเวลาเริ่มต้นของเหตุการณ์
- ตารางเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์
- วัตถุต้นกำเนิดของเหตุการณ์
- จุดควบคุมเส้นทางของเหตุการณ์

การทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดที่ลดลงนั้น จะทำการค้นหาโดยให้ระยะเวลาสูงสุดที่จะทำการจำลองเหตุการณ์มีค่าเท่ากับ 25 หน่วยเวลา ซึ่งเป็นการค้นหาด้วยระยะเวลาครึ่งหนึ่งของระยะเวลาสูงสุดที่ระดับความละเอียดตั้งต้น คือ 50 หน่วยเวลา เนื่องจากระดับความละเอียดด้านพื้นที่ลดลงครึ่งหนึ่ง จึงต้องทำการลดระยะเวลาที่ทำการค้นหาลงด้วยเพื่อให้สอดคล้องกัน

การปรับลดระดับความละเอียดนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การปรับลดระดับความละเอียดด้านตำแหน่งและพื้นที่ และการปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลา

4.3.1 การปรับลดระดับความละเอียดด้านตำแหน่งและพื้นที่

สำหรับการปรับลดระดับความละเอียดด้านตำแหน่งและพื้นที่นั้น จะทำกับตารางเวลาเริ่มต้นของเหตุการณ์, ตารางเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์ และวัตถุต้นกำเนิดของเหตุการณ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

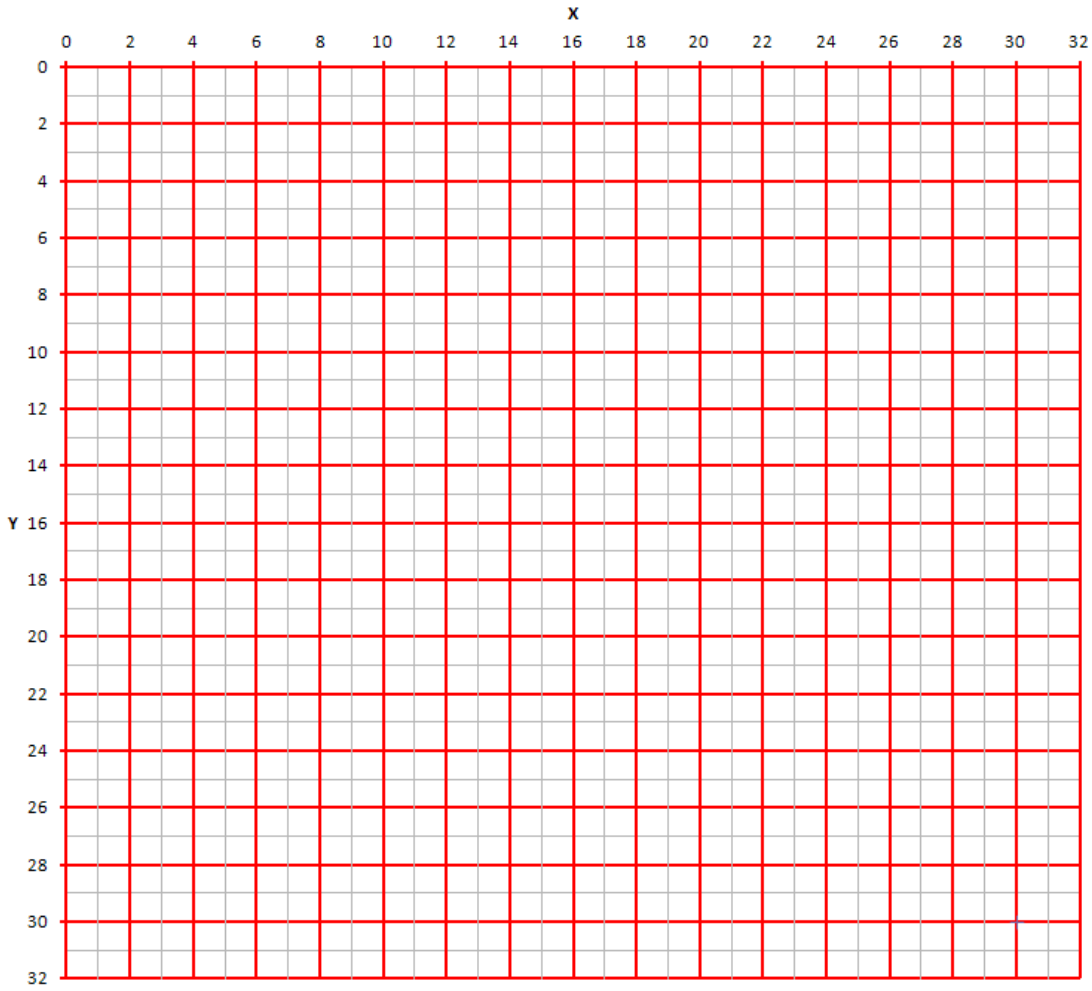
ในการปรับลดระดับความละเอียดด้านตำแหน่งนั้น ตำแหน่งใหม่ที่ระดับความละเอียดต่ำสามารถหาได้โดยตำแหน่งใหม่ในแต่ละทิศทางจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าตำแหน่งเดิมในทิศทางนั้นๆ ดังแสดงในสมการ (11) โดย x เป็นตำแหน่งในทิศทางด้านกว้าง และ y เป็นทิศทางด้านสูง

$$NewPosition.x = Position.x / 2$$

$$NewPosition.y = Position.y / 2 \quad (11)$$

สำหรับการปรับลดระดับความละเอียดด้านตำแหน่งที่ทำกับวัตถุต้นกำเนิดของเหตุการณ์นั้น จะทำการคำนวณหาค่าตำแหน่งของวัตถุต้นกำเนิดของเหตุการณ์ใหม่ โดยถ้าหากหลังจากทำการปรับลดระดับความละเอียดแล้วมีวัตถุต้นกำเนิดของเหตุการณ์มากกว่า 1 วัตถุที่ตำแหน่งเดียวกันที่เริ่มต้นให้ผลที่เวลาเดียวกัน จะตัดวัตถุต้นกำเนิดของเหตุการณ์ดังกล่าวเหลือเพียง 1 วัตถุเท่านั้น

ในการปรับลดระดับความละเอียดด้านพื้นที่นั้น จะทำการจัดกลุ่มเซลล์บนแผนที่เป็นกลุ่มละ 4 เซลล์ แล้วทำการยุบรวมแต่ละกลุ่มของเซลล์ให้กลายเป็น 1 เซลล์ใหม่ที่ระดับความละเอียดที่ลดลง โดยทำการจัดกลุ่มเซลล์ตามภาพที่ 38 โดยเส้นสีอ่อนแสดงตารางของเซลล์ตั้งต้น และเส้นสีเข้มแสดงตารางของเซลล์ที่ถูกทำการปรับลดระดับความละเอียดด้านพื้นที่แล้ว ซึ่งในกรณีของแผนที่ขนาด 32x32 เซลล์นั้น แผนที่ใหม่ที่ได้จากการปรับลดความละเอียดจะมีขนาด 16x16 เซลล์ โดยการเลือกค่าเวลาที่จะนำมากำหนดให้กับเซลล์ใหม่นั้น ขึ้นอยู่กับสิ่งที่กำลังทำการปรับลดระดับความละเอียด



ภาพที่ 38: การจัดกลุ่มเซลล์เพื่อทำการลดระดับความละเอียดสำหรับแผนที่ขนาด 32x32 เซลล์

สำหรับการปรับลดระดับความละเอียดด้านพื้นที่ซึ่งทำกับตารางเวลาเริ่มต้นของเหตุการณ์ และตารางเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์นั้น จะมีวิธีการเลือกค่าเวลาให้กับเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: วิธีการเลือกค่าเวลาให้กับเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ที่ระดับความละเอียดลดลง

สิ่งที่ทำการปรับลดระดับความละเอียด	วิธีการเลือกค่าเวลา
ตารางเวลาเริ่มต้นของเหตุการณ์	เลือกค่าที่น้อยที่สุดใน 4 เซลล์ตั้งต้น
ตารางเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์	เลือกค่าที่มากที่สุดใน 4 เซลล์ตั้งต้น

4.3.2 การปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลา

สำหรับการปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลานั้น จะทำกับตารางเวลาเริ่มต้นของเหตุการณ์, ตารางเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์, วัตถุต้นกำเนิดของเหตุการณ์, และจุดควบคุมเส้นทางของเหตุการณ์ ซึ่งสาเหตุที่ต้องทำการปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลากับจุดควบคุมเส้นทางของเหตุการณ์แม้ว่าจุดควบคุมเส้นทางของเหตุการณ์จะไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความเหมาะสมโดยตรงนั้น เนื่องมาจากว่าการคำนวณหาค่าความเหมาะสมมีการคิดค่าความเหมาะสมโดยให้น้ำหนักของค่าความเหมาะสม ณ จุดเวลาที่ของจุดควบคุมเส้นทางของเหตุการณ์สูงกว่าน้ำหนักของค่าความเหมาะสม ณ เวลาอื่นๆ จึงจำเป็นต้องทำการลดระดับความละเอียดด้านเวลาของจุดควบคุมเส้นทางของเหตุการณ์ด้วย

การปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลานั้น เนื่องจากค่าเวลาเริ่มต้นของการจำลองสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองเริ่มที่ค่าเวลาเท่ากับ 0 และค่าเวลาแรกที่สามารถเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ขึ้นได้คือค่าเวลาเท่ากับ 1 จึงไม่สามารถนำค่าเวลามาทำการหารด้วย 2 แล้วปัดเศษลงโดยตรงได้เพราะจะทำให้เกิดสถานการณ์ที่เงื่อนไขของเหตุการณ์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง คือ เงื่อนไขที่เหตุการณ์จะต้องเกิดที่ค่าเวลาเท่ากับ 0 ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้โดยทำการบวก 1 เข้าไปก่อนทำการหารด้วย 2 ซึ่งจะได้วิธีการคำนวณค่าเวลาใหม่ตามสมการ (12)

$$NewTime = rounddown((Time + 1) / 2) \quad (12)$$

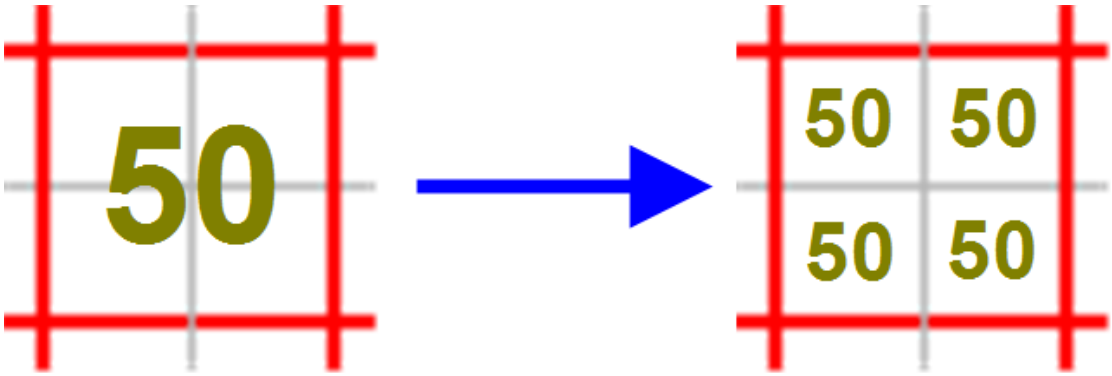
นอกจากนั้น ในการปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลาสำหรับตารางเวลาเริ่มต้นของเหตุการณ์และตารางเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์ ยังมีปัญหาอีกจุดหนึ่งคือ ค่าเวลาเริ่มต้นสูงสุดที่เป็นไปได้ในโปรแกรมเดิมคือ 49 และมีค่าเวลาที่ใช้กำหนดว่าจะต้องไม่เกิดเหตุการณ์ขึ้นคือ 50 ซึ่งหากทำการคำนวณด้วยสมการ (12) แล้ว จะพบว่าค่าเวลาใหม่ที่ได้มีค่าเท่ากัน คือ 25 ซึ่งจะทำให้เกิดความสับสนขึ้น จึงต้องทำการปรับแก้โดยกำหนดให้ถ้าหากพบค่าเวลา 50 จะทำการกำหนดค่าเวลาใหม่เป็น 26 แทน และหลังจากที่ทำการปรับลดระดับความละเอียดด้านเวลาให้กับตารางเวลาแล้ว จะต้องทำการตรวจสอบแต่ละตำแหน่งในตารางเวลาทั้ง

สองแบบที่ทำการปรับลดระดับความละเอียดแล้วว่ามีกรณีที่ค่าเวลาเริ่มต้นและค่าเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์เท่ากันเกิดขึ้นหรือไม่ โดยถ้าหากพบว่ามีกรณีดังกล่าวเกิดขึ้น จะทำการเพิ่มค่าเวลาสิ้นสุดของเหตุการณ์ขึ้นอีก 1 หน่วยเวลา

เมื่อทำการปรับลดระดับความละเอียดของสิ่งที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความเหมาะสมในการค้นหาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งต่อไป และหลังจากที่ได้ผลลัพธ์จากการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งแล้ว ก่อนที่จะสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของประชากรเพื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น ก็จำเป็นต้องทำการเพิ่มระดับให้กับผลลัพธ์ที่ได้เสียก่อน

4.3.3 การเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง

การเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงนั้น ทำได้โดยการกำหนดค่าให้กับเซลล์ทั้ง 4 ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่ถูกยุบรวมเป็น 1 เซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงตามภาพที่ 38 โดยกำหนดให้แต่ละเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นมีค่าสมบัติต่างๆ เท่ากับค่าสมบัติของเซลล์ที่ได้จากการรวมกันของเซลล์ทั้ง 4 เหมือนกันทั้งหมดทุกค่าสมบัติ ดังตัวอย่างในภาพที่ 39

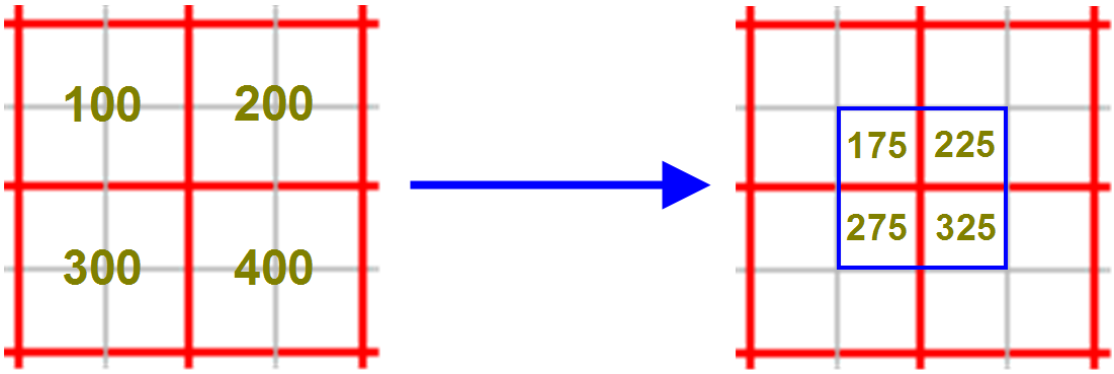


ภาพที่ 39: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่โดยตรง

เมื่อทำการเพิ่มระดับความละเอียดให้กับผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะนำผลที่ได้มาใช้เป็นหนึ่งในประชากรตั้งต้นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นต่อไป แต่เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งโดยใช้จำนวนรุ่นของประชากรต่างๆ กัน ได้แก่ 20 รุ่น, 40 รุ่น, 60 รุ่น, 80 รุ่น และ 100 รุ่น มาทำการเพิ่มระดับความละเอียดและทำการค้นหาเพื่อวัดผลเปรียบเทียบกัน แล้วจึงนำผลที่ดีที่สุดมาทำการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีอื่นๆ ต่อไป

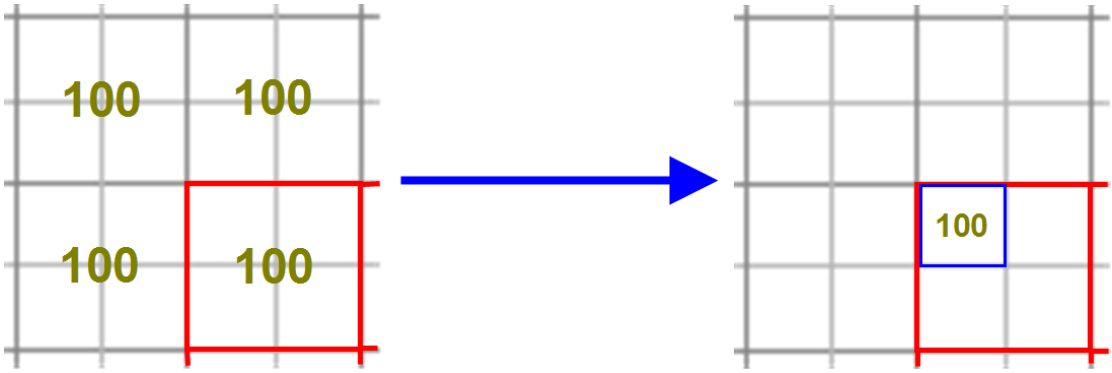
4.3.4 การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน

การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันนั้น จะทำโดยการกำหนดให้ค่าของเซลล์ที่ระดับความละเอียดต่ำมีตำแหน่งอยู่ที่จุดกึ่งกลางเซลล์ และใช้วิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันเพื่อทำการกำหนดค่าให้กับเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่อยู่ภายในขอบเขตที่ถูกล้อมรอบด้วยจุดกึ่งกลางของเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงโดยทำการกำหนดน้ำหนักให้กับตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เช่นเดียวกัน โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางเซลล์ที่ระดับความละเอียดต่ำมีค่าเท่ากับ 1 และระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นกับจุดกึ่งกลางเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงที่อยู่ตำแหน่งติดกัน มีระยะห่างในแต่ละแกนเท่ากับ 0.25 และระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่อยู่ห่างออกไปจากจุดกึ่งกลางเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงมีระยะห่างในแต่ละแกนเท่ากับ 0.75 ซึ่งจะได้ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันเป็นดังในภาพที่ 40



ภาพที่ 40: ตัวการอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน

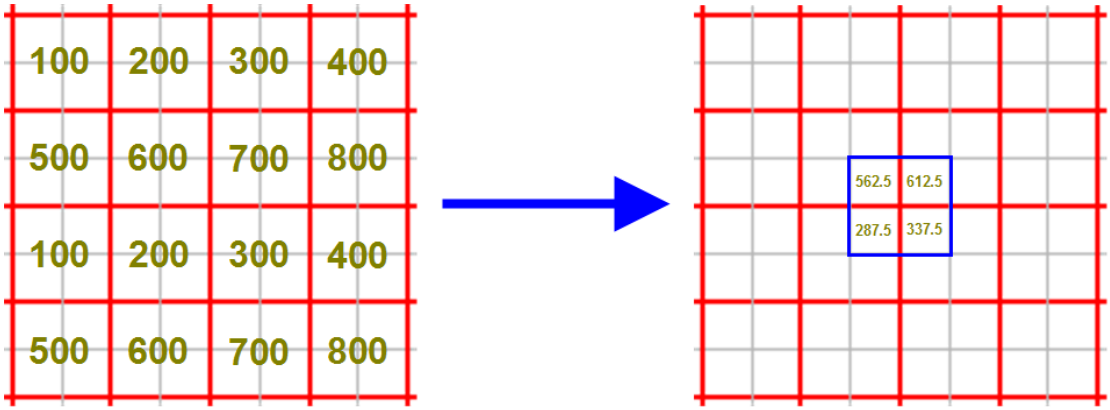
สำหรับในกรณีของเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่อยู่บริเวณขอบหรือมุมซึ่งจะทำให้มีจุดกึ่งกลางเซลล์ของเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณไม่ครบนั้น จะทำการคำนวณเสมือนว่าเซลล์ที่ขาดไปมีค่าเท่ากับค่าของเซลล์ที่ขอบหรือมุม ณ ตำแหน่งนั้น ดังตัวอย่างในภาพที่ 41 โดยเซลล์ที่ไม่มีขอบสีเข้มในภาพซ้ายมือคือเซลล์ที่ขาดไป



ภาพที่ 41: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันบริเวณมุม

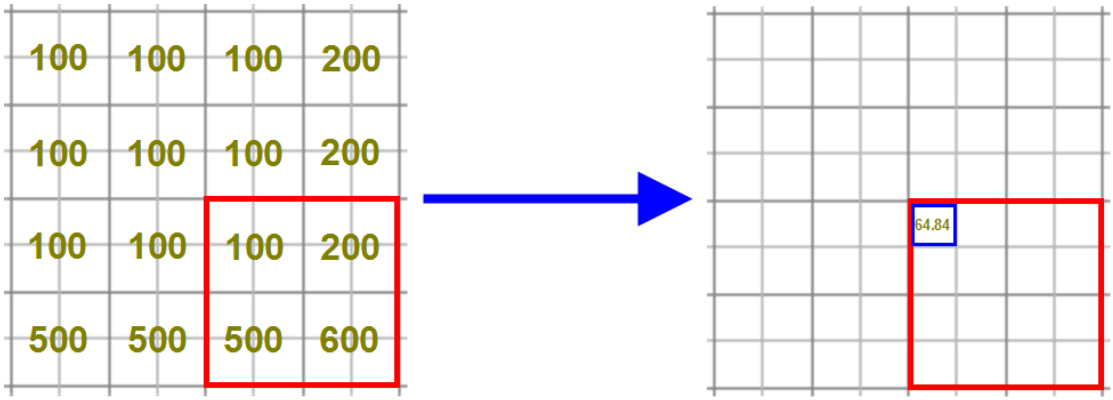
4.3.5 การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน

การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันนั้น จะทำโดยการกำหนดให้ค่าของเซลล์ที่ระดับความละเอียดต่ำมีตำแหน่งอยู่ที่จุดกึ่งกลางเซลล์เช่นเดียวกัน แล้วจึงใช้วิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันเพื่อทำการกำหนดค่าให้กับเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่อยู่ภายในขอบเขตที่ถูกล้อมรอบด้วยจุดกึ่งกลางของเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลง โดยมีการกำหนดระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงและระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นกับจุดกึ่งกลางเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงเป็นเช่นเดียวกับในการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน ภาพที่ 42 (ซ้าย) แสดงส่วนของแผนที่ซึ่งต้องทำการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน และภาพที่ 42 (ขวา) แสดงค่าของสี่เซลล์ย่อยตรงกลางหลังจากเพิ่มระดับความละเอียดแล้ว



ภาพที่ 42: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน

สำหรับในกรณีของเซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่อยู่บริเวณขอบหรือมุมซึ่งจะมีจุดกึ่งกลางเซลล์ของเซลล์ที่ระดับความละเอียดที่ลดลงที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณไม่ครบนั้น ก็จะทำการคำนวณเสมือนว่าเซลล์ที่ขาดไปมีค่าเท่ากับค่าของเซลล์ที่ขอบหรือมุม ณ ตำแหน่งนั้น เช่นเดียวกับการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน ภาพที่ 43 (ขวา) แสดงผลของการเพิ่มระดับความละเอียดที่เซลล์ย่อยริมซ้ายบนของขอบด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน



ภาพที่ 43: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของแผนที่ด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันบริเวณมุม

บทที่ 5

การทดสอบ ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายการทดสอบ ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผล ที่ได้ทำในวิทยานิพนธ์นี้

5.1 การทดสอบการทำงาน

การทดสอบและวัดผลในงานวิจัยนี้จะทำตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อขอบเขตการดำเนินงาน กล่าวคือ

- ทดสอบโดยการสุ่มสร้างเหตุการณ์บนแผนที่จำนวน 100 แบบ โดยแบ่งเป็นเหตุการณ์การลามของไฟ 50 แบบ และเหตุการณ์การไหลของน้ำ 50 แบบ
- ทดสอบด้วยแผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์
- ทำการทดสอบโดยใช้จำนวนประชากรขนาด 1000 หน่วยทั้งในการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งและในการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น
- การค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นเพียงอย่างเดียวจะทำการทดสอบโดยใช้จำนวนรุ่นของประชากร 100, 120, 140, 160, 180, 200 รุ่น
- การค้นหาแบบหลายระดับความละเอียดจะทำการทดสอบโดยใช้จำนวนรุ่นของประชากรในการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่ง 20, 40, 60, 80 และ 100 รุ่น แล้วจึงนำผลที่ได้มาทำการค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้นเป็นจำนวน 100 รุ่น
- เหตุการณ์ที่สุ่มทดสอบ ได้แก่ การลามของไฟ และการไหลของน้ำ
- เหตุการณ์ที่สุ่มทดสอบจะต้องเป็นเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้จริง
- มีจุดควบคุมเส้นทางในทุกเหตุการณ์ตั้งแต่ 2 ถึง 5 จุด
    - สุ่มตำแหน่งทั่วทั้งแผนที่
    - สุ่มขนาดรัศมีตั้งแต่ 1 ถึง 2 หน่วย
    - สุ่มเวลาเกิดไม่เกิน 50 หน่วยเวลา
- ไม่มีลมและผลกระทบที่เกิดจากลมต่อเหตุการณ์ต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง
- วัดผลการทำงานโดยใช้ค่าดังต่อไปนี้
    - ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงต่อเหตุการณ์ที่โปรแกรมกำหนดให้เกิดจากเส้นทางที่ผู้ใช้ลากในพื้นที่ และเวลา ณ จุดควบคุมเส้นทาง

- ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางต่อพื้นที่ที่เป็นเส้นทางของเหตุการณ์ รวมทุกเหตุการณ์

โดยมีลำดับขั้นตอนในการทดสอบและวัดผลเป็นดังต่อไปนี้

- ทดสอบหาความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้นจากการนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้แทนการประมวลผลบนหน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียวแบบที่ใช้ในงานวิจัยเดิม

- ในกรณีของเหตุการณ์การลามของไฟ จะทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบที่ใช้ในโปรแกรมในงานวิจัยเดิม กับการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ทำการปรับแก้การกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนที่เสนอในงานวิจัยนี้

- ทดสอบหาจำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อนำผลที่ได้จากการค้นหามาทำการเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงและใช้ในการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น

- ทดสอบเปรียบเทียบวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดแบบต่างๆ เพื่อหาวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดที่ให้ผลลัพธ์ของการค้นหาที่ดีที่สุด

อุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบ คือ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบเดสก์ท็อปที่ประกอบด้วย CPU Intel Core i7-920 RAM DDR3 6GB และใช้ GPU Nvidia GTX 295 1792MB แต่หลังจากทำการทดลองด้านความเร็วเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งในส่วนของ CPU และ GPU โดยไม่สามารถหาอุปกรณ์ทดแทนในรุ่นเดิมได้ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบที่เหลือต่อโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบเดสก์ท็อปที่ประกอบด้วย CPU Intel Core i7-3770 RAM DDR3 8GB และใช้ GPU Nvidia GTX 670 2GB แทน

5.2 การทดสอบหาความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้นจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ

ในการทดสอบเพื่อหาความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้นจากการนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้นั้น จะแบ่งทำการทดสอบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ และการทดสอบสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ โดยใช้กฎของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองในงานวิจัยเดิมทำการทดสอบเปรียบเทียบบนแผนที่

ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์เป็นจำนวน 50 การทดสอบสำหรับเหตุการณ์แต่ละอย่าง โดยได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7 และมีระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับขั้นตอนต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 8 และตารางที่ 9 สำหรับผลการทดลองโดยละเอียดนั้นจะอยู่ที่ภาคผนวก ข

ตารางที่ 7: ผลการทดสอบหาความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ

เหตุการณ์	เวลาที่ใช้ในการประมวลผลเฉลี่ย(วินาที)		ความเร็วที่เพิ่มขึ้น (จำนวนเท่า)
	หน่วยประมวลผลกลาง	หน่วยประมวลผลภาพ	
การลามของไฟ	1,395.82	461.64	3.02
การไหลของน้ำ	458.81	370.30	1.24

ตารางที่ 8: ระยะเวลาที่ใช้สำหรับขั้นตอนต่างๆ ของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ

ขั้นตอน	หน่วยประมวลผลกลาง		หน่วยประมวลผลภาพ		ความเร็วที่เพิ่มขึ้น (จำนวนเท่า)
	ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที)	สัดส่วนของเวลาที่ใช้ (ร้อยละ)	ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที)	สัดส่วนของเวลาที่ใช้ (ร้อยละ)	
การจำลองเหตุการณ์	1,368.84	98.07	223.01	48.31	6.138
การวัดค่าความเหมาะสม	23.66	1.70	134.15	29.05	0.176
การกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยน	3.31	0.23	1.14	0.25	6.672
การจัดการหน่วยความจำ	-	-	103.34	22.39	-

ตารางที่ 9: ระยะเวลาที่ใช้สำหรับขั้นตอนต่างๆ ของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ

ขั้นตอน	หน่วยประมวลผลกลาง		หน่วยประมวลผลภาพ		ความเร็วที่เพิ่มขึ้น (จำนวนเท่า)
	ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที)	สัดส่วนของเวลาที่ใช้ (ร้อยละ)	ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที)	สัดส่วนของเวลาที่ใช้ (ร้อยละ)	
การจำลองเหตุการณ์	438.37	95.54	155.29	41.94	2.822
การวัดค่าความเหมาะสม	17.09	3.73	122.35	33.04	0.140
การกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยน	3.35	0.73	0.68	0.18	9.828
การจัดการหน่วยความจำ	-	-	91.98	24.84	-

จากผลการทดสอบในตารางที่ 7 พบว่าการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ มีความเร็วในการทำงานมากกว่าการใช้การคำนวณบนหน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียวสำหรับเหตุการณ์ทั้งสองแบบ โดยมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นของเหตุการณ์การลามของไฟมากกว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นของเหตุการณ์การไหลของน้ำ เนื่องจากในส่วนของขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์ซึ่งเป็นส่วนหลักของการทำงานนั้น อัตราความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้นสำหรับการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมีอัตราความเร็วที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราความเร็วที่เพิ่มขึ้นของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำอยู่มาก ตามตารางที่ 8 และตารางที่ 9 ทำให้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟมีค่าสูงกว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเป็นอย่างมาก สาเหตุที่การจำลองเหตุการณ์การลามของไฟสามารถทำการคำนวณแบบขนานได้ดีกว่าการจำลองเหตุการณ์การไหลของน้ำนั้น น่าจะเป็นเพราะการคำนวณที่ใช้ในการจำลอง

เหตุการณ์การไหลของน้ำนั้นมีขั้นตอนในการคำนวณน้อยกว่าการคำนวณที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์การลามของไฟ ทำให้เวลาส่วนใหญ่ที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ถูกใช้ไปกับการอ่านและเขียนหน่วยความจำเป็นหลัก

5.3 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยเดิมกับการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้พบข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้องกับการกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยเดิม จึงได้ทำการเสนอวิธีการใหม่ที่ไม่ใช้การกลายพันธุ์ และมีการปรับเปลี่ยนวิธีการไขว้เปลี่ยนในส่วนที่เกี่ยวข้องกับค่าลักษณะของพื้นที่ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า เพื่อนำวิธีนั้นมาใช้ทำการทดลองอื่นๆ ต่อไป โดยในการทดสอบเปรียบเทียบนี้ จะทำการทดสอบโดยใช้แผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์ จำนวน 50 แผนที่ต่อเหตุการณ์แต่ละอย่าง โดยใช้กฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ที่ทำการแก้ไขแล้วมาทำการทดสอบแต่ละแผนที่เป็นจำนวน 3 ครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยรวมของค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงต่อเหตุการณ์ที่โปรแกรมกำหนดให้มาใช้ในการเปรียบเทียบหาวิธีที่ดีกว่า ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 10 สำหรับผลการทดลองโดยละเอียดนั้นจะอยู่ที่ภาคผนวก ข

ตารางที่ 10: ผลการทดสอบเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยเดิมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่เสนอในงานวิจัยนี้

เหตุการณ์	ค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง	
	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยเดิม	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้
การลามของไฟ	39.76	67.43

จากผลการทดลองในตารางที่ 10 จะพบว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ได้รับการปรับแก้ในงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยเดิมอย่างเห็นได้ชัด การทดสอบการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดต่อจากนี้จึงจะนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ได้รับการปรับแก้ในงานวิจัยนี้มาใช้ในการค้นหาเพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่อไป

5.4 การทดสอบจำนวนรุ่นในการทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อนำผลที่ได้จากการค้นหามาทำการเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงและใช้ในการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น

ในงานวิจัยนี้ได้นำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดมาใช้เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหามีคุณภาพดีขึ้น แต่เนื่องจากการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งนั้น ถ้าหากทำการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นจำนวนรุ่นน้อยเกินไป ก็อาจจะทำให้ยังไม่ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับการนำมาเพิ่มระดับความละเอียดและใช้ค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้นได้ และในทางกลับกัน ถ้าหากทำการค้นหาเป็นจำนวนรุ่นมากเกินไป ก็อาจจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหานั้นยึดติดกับเงื่อนไขของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งมากเกินไป ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นเมื่อนำมาเพิ่มระดับความละเอียดแล้ว จะมีความคลาดเคลื่อนจากเงื่อนไขของการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นมากเกินไป ทำให้การค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้นมีประสิทธิภาพไม่เต็มที่ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบโดยทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน แล้วนำผลที่ได้มาเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงแล้วทำการค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้น โดยจะทำการค้นหา 3 ครั้งต่อการค้นหาที่ใช้การค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นหนึ่งๆ แล้วเปรียบเทียบโดยใช้ค่าเฉลี่ยรวมของค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงต่อเหตุการณ์ที่โปรแกรมกำหนดให้ในการเปรียบเทียบเพื่อหาจำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งที่ให้ผลลัพธ์สุดท้ายจากการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่ดีที่สุด ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 11 ตารางที่ 12 และตารางที่ 13 สำหรับผลการทดลองโดยละเอียดนั้นจะอยู่ที่ภาคผนวก ข

ตารางที่ 11: ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงโดยใช้จำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน

เหตุการณ์	จำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นเพียงอย่างเดียว					
	100	120	140	160	180	200
การลามของไฟ	67.43	72.16	72.18	72.18	72.18	72.18
การไหลของน้ำ	86.41	87.78	88.45	89.04	89.50	89.57

เหตุการณ์	จำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งแล้วทำการค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้น 100 รุ่น				
	20	40	60	80	100
การลามของไฟ	71.25	73.52	74.37	74.33	72.73
การไหลของน้ำ	86.09	91.63	92.09	92.71	93.08

ตารางที่ 12: ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทาง โดยใช้จำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน

เหตุการณ์	จำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นเพียงอย่างเดียว					
	100	120	140	160	180	200
การลามของไฟ	6.37	4.62	4.59	4.59	4.59	4.59
การไหลของน้ำ	10.66	9.63	9.46	8.96	8.93	8.77

เหตุการณ์	จำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งแล้วทำการค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้น 100 รุ่น				
	20	40	60	80	100
การลามของไฟ	10.09	13.35	10.48	10.30	12.75
การไหลของน้ำ	6.00	6.02	6.82	6.09	5.68

ตารางที่ 13: ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาเป็นวินาทีโดยใช้จำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวนรุ่นต่างๆ กัน

เหตุการณ์	จำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นเพียงอย่างเดียว					
	100	120	140	160	180	200
การลามของไฟ	299.46	332.41	386.48	440.56	494.63	548.70
การไหลของน้ำ	158.89	163.36	190.41	217.45	244.29	271.56

เหตุการณ์	จำนวนรุ่นที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งแล้วทำการค้นหาต่อที่ระดับความละเอียดตั้งต้น 100 รุ่น				
	20	40	60	80	100
การลามของไฟ	273.54	302.14	324.22	353.23	380.06
การไหลของน้ำ	155.54	174.44	197.34	213.58	220.34

จากผลที่แสดงในตารางที่ 11 และตารางที่ 12 การค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 รุ่นแล้วนำผลที่ได้มาทำการเพิ่มระดับความละเอียดและใช้เป็นหนึ่งในประชากรเริ่มต้นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น และการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 100 รุ่นแล้วนำผลที่ได้มาทำการเพิ่มระดับความละเอียดและใช้เป็นหนึ่งในประชากรเริ่มต้นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น ซึ่งมีจุดที่น่าสังเกตคือ สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ แม้ว่าการนำผลจากการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งมาใช้ทำการค้นหาต่อจะให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นในแง่ของค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง แต่ก็ทำให้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางเพิ่มขึ้นด้วย

เช่นกัน ซึ่งเกิดจากการที่ผลที่ได้จากการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งนั้น เมื่อนำมาเพิ่มระดับความละเอียด เซลล์ที่ติดไฟได้ง่ายที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งจะเพิ่มจำนวนจาก 1 เซลล์เป็น 4 เซลล์ที่ระดับความละเอียดตั้งต้น ทำให้การลามของไฟเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงมีค่าสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน เซลล์ที่สามารถติดไฟได้ง่ายที่ได้จากการเพิ่มระดับความละเอียดนั้นไม่จำเป็นว่าจะต้องเป็นเซลล์ที่อยู่บนเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้ของเหตุการณ์เสมอไป ทำให้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนในด้านเวลานั้น เห็นได้ชัดเจนว่า เวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับทั้งเหตุการณ์การลามของไฟและเหตุการณ์การไหลของน้ำมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดเข้ามาช่วย การทดสอบหลังจากนี้จะใช้ผลการทดลองของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 รุ่นมาใช้ในการทดลองต่อ และจะใช้ผลการทดลองของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำที่ทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 100 รุ่นมาใช้ในการทดลองต่อ โดยสาเหตุที่เลือกใช้ผลที่ได้จากการใช้ผลการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 รุ่นสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟนั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงมากกว่าค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทาง ซึ่งผลที่ได้จากการใช้ผลการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 และ 80 รุ่นนั้น ผลที่ได้จากการใช้การค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 รุ่นมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงมากกว่าเล็กน้อย และแม้จะมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสูงกว่า แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

5.5 การทดสอบเปรียบเทียบวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดแบบต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการนำผลการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งมาทำการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน และการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน เพื่อค้นหาวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยใช้ผลการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งที่ให้ผลลัพธ์ของการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้นที่ดีที่สุดมาทำการทดลองเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีต่างๆ ต่อไปแล้วทำการค้นหาเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ โดยการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ จะนำผลการค้นหาที่ได้จากการทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 รุ่นมาใช้ และการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำจะนำผลการค้นหาที่ได้จากการทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 100 รุ่นมาใช้ โดยได้ผลการทดลองดังตารางที่ 14 และตารางที่ 15 สำหรับผลการทดลองโดยละเอียดนั้นจะอยู่ที่ภาคผนวก ข

ตารางที่ 14: ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้วิธีการเพิ่มระดับความละเอียดแบบต่างๆ ในการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

เหตุการณ์	ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง			ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทาง		
	เพิ่มโดยตรง	ไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน	เพิ่มโดยตรง	ไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
การลามของไฟ	74.37	78.73	78.68	10.48	6.21	5.71
การไหลของน้ำ	93.08	87.95	91.28	5.68	9.66	7.70

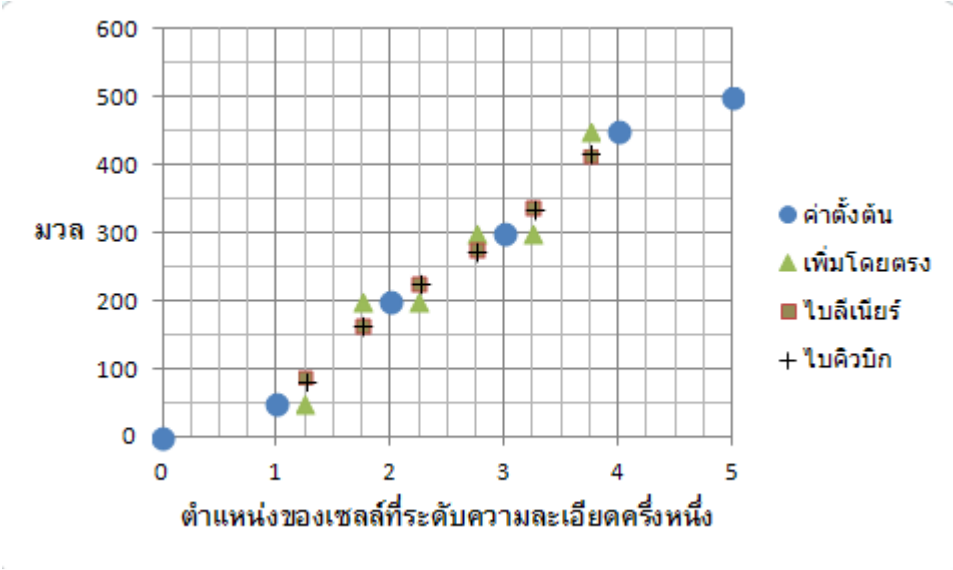
ตารางที่ 15: ผลการทดสอบเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาเป็นวินาทีจากการใช้วิธีการเพิ่มระดับความละเอียดแบบต่างๆ ในการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

เหตุการณ์	ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที)		
	เพิ่มโดยตรง	ไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	ไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
การลามของไฟ	324.22	361.36	357.03
การไหลของน้ำ	220.34	214.54	216.59

จากผลการทดลองดังที่แสดงในตารางที่ 14 การค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 รุ่นแล้วนำผลที่ได้มาทำการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน และใช้เป็นหนึ่งในประชากรเริ่มต้นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ

การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันก็ให้ผลที่ดีใกล้เคียงกันอย่างมาก โดยมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางต่ำกว่า และในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 100 รุ่นแล้วนำผลที่ได้มาทำการเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงและใช้เป็นหนึ่งในประชากรเริ่มต้นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดตั้งต้น

สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟนั้น การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันและวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันให้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสูงกว่าการเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง เนื่องจากการเพิ่มระดับความละเอียดด้วย 2 วิธีข้างต้นนั้น ทำให้ปริมาณความจุความร้อนของเซลล์ทยอยเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับตามระยะทางในทุกๆ เซลล์ที่อยู่ติดกัน ดังตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดใน 1 มิติตามภาพที่ 44 เมื่อกำหนดให้เซลล์ทั้งหมดมีลักษณะของพื้นที่เหมือนกันทุกเซลล์ทำให้ความจุความร้อนของเซลล์แปรตามค่ามวลของเซลล์เพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้การติดไฟของเซลล์เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเนื่องจากปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากเซลล์ที่ติดไฟไปยังเซลล์ที่ยังไม่ติดไฟนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิและความจุความร้อนของเซลล์ที่ติดไฟอยู่ ส่งผลทำให้การลามของไฟเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องมากกว่า ทำให้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงมีค่าสูงกว่า



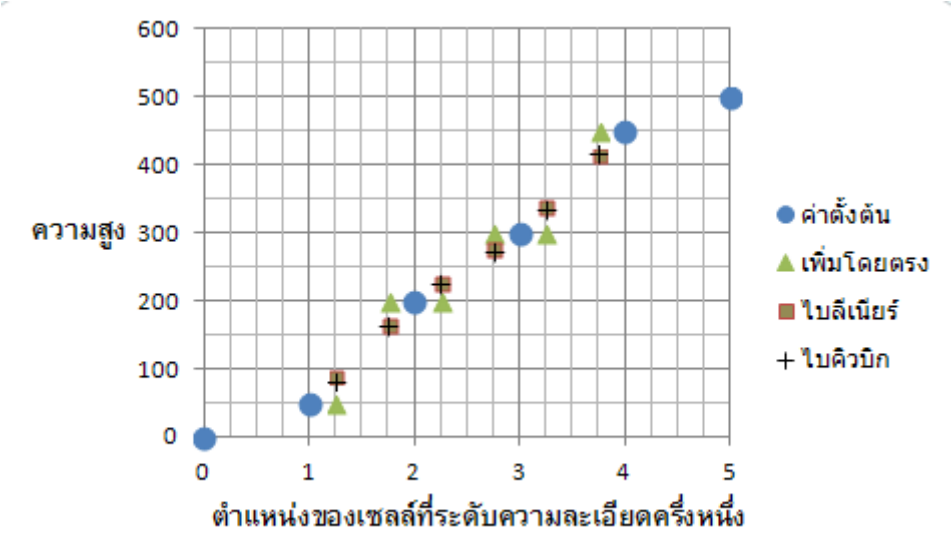
ภาพที่ 44: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของค่ามวลใน 1 มิติ

ในการนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดไปใช้ ควรใช้การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันเนื่องจากให้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสูงที่สุด โดยค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางมีค่าสูงกว่าการเพิ่มระดับความละเอียดด้วย

วิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนั้น การเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันยังสามารถทำการคำนวณได้ง่ายกว่าด้วย

ในด้านของเวลานั้น วิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันใช้เวลามากกว่าวิธีไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชันอยู่เล็กน้อยแม้ว่าจะสามารถทำการคำนวณได้ง่ายกว่า แต่ทั้งนี้คำสั่งที่ใช้ในการวัดเวลานั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นค่าเวลาที่ใกล้เคียงกันเช่นนี้จึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีใดมีความเร็วมากกว่ากัน

สำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ การเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงจะให้ผลดีที่สุด เนื่องจากการไหลของน้ำไปยังตำแหน่งที่สูงกว่านั้น น้ำในเซลล์นั้นจะต้องถูกเพิ่มปริมาณจนมีค่าปริมาณน้ำและค่าความสูงมากกว่าหรือเท่ากับค่าความสูงของเซลล์ปลายทางเสียก่อน การเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงนั้น จะทำให้จำนวนรอยต่อระหว่างการไหลไปยังเซลล์ที่สูงกว่ามีจำนวนน้อยกว่าจำนวนรอยต่อที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีอื่นๆ 2 วิธีที่เหลือ ดังตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดใน 1 มิติตามภาพที่ 45 เนื่องจากรอยต่อจะเกิดขึ้นเฉพาะระหว่างกลุ่มของเซลล์ 4 เซลล์ที่เกิดจากเซลล์ที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเท่านั้น แต่จะไม่มีรอยต่อภายในกลุ่ม ทำให้การไหลของน้ำเป็นไปอย่างต่อเนื่องมากกว่า ซึ่งทำให้ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงมีค่าสูงกว่า ในขณะที่อีก 2 วิธีที่เหลือนั้น จะทำให้จำนวนรอยต่อระหว่างการไหลไปยังเซลล์ที่สูงกว่ามีจำนวนมากกว่า เนื่องจากเป็นการประมาณค่าในทุกๆ จุด ทำให้ค่าความสูงของเซลล์ทยอยเพิ่มขึ้นตามระยะทางในทุกๆ เซลล์ที่อยู่ติดกัน



ภาพที่ 45: ตัวอย่างการเพิ่มระดับความละเอียดของค่าความสูงใน 1 มิติ

ในการนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดไปใช้ ควรใช้การเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงเนื่องจากให้ค่าร้อยละของเหตุกาณ์ที่เกิดจริงสูงที่สุดและค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางมีค่าต่ำที่สุด

นอกจากนั้น ยังพบว่ามีบางเหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำการค้นหาให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีได้ไม่ว่าจำนวนรุ่นของการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งที่ใช้จะเป็นเท่าไร และไม่ว่าจะใช้วิธีการเพิ่มระดับความละเอียดใดๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็ตาม โดยจะขอกำหนดวิธีแสดงข้อมูลของจุดควบคุมเส้นทางของเหตุการณ์ในรูปลำดับของกลุ่มค่า (A, B, C, D) โดยให้

- A แสดงตำแหน่งของจุดควบคุมในแนวแกนนอน (x)
- B แสดงตำแหน่งของจุดควบคุมในแนวแกนตั้ง (y)
- C แสดงขนาดรัศมีของจุดควบคุม
- D แสดงค่าเวลาของจุดควบคุม

สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ จะมีเหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำการค้นหาให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีได้ ได้แก่

- เหตุการณ์ที่มีจุดควบคุมเส้นทางเป็น (23,0,1,1)-(17,30,1,40) ซึ่งมีระยะทางระหว่างจุดควบคุมเหตุการณ์ทั้งสองจุดเป็นระยะทาง 36 เซลล์ และมีระยะเวลาสำหรับการเกิดการลามของไฟระหว่างจุดควบคุมทั้งสองจุดเป็นระยะเวลา 39 หน่วยเวลา ซึ่งจะเห็นได้ว่าเพื่อที่จะให้เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นได้นั้น การลามของไฟจะต้องเป็นไปอย่างต่อเนื่องและแทบไม่มีการหยุดชะงักแม้แต่น้อย ด้วยเงื่อนไขด้านระยะทางที่ค่อนข้างไกลและเงื่อนไขด้านเวลาที่มีอย่างจำกัดนั้น ทำให้การค้นหาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีเป็นไปได้ยาก ผลการค้นหาที่ดีที่สุดสำหรับเหตุการณ์นี้จึงมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดเป็น 57.41 และมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางเป็น 0.62
- เหตุการณ์ที่มีจุดควบคุมเส้นทางเป็น (7,14,2,1)-(8,18,1,26)-(5,23,1,34)-(8,26,1,49) ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดควบคุมเส้นทางทั้งหมดอยู่ห่างกันไม่มาก แต่มีระยะเวลาระหว่างจุดควบคุมเส้นทางห่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้การลามของไฟจำเป็นต้องเป็นไปอย่างช้ามากๆ ซึ่งทำให้สามารถเกิดขึ้นจริงได้ยาก ผลการค้นหาที่ดีที่สุดสำหรับเหตุการณ์นี้จึงมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดเป็น 53.97 และมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางเป็น 6.37

- เหตุการณ์ที่มีจุดควบคุมเส้นทางเป็น (25,23,2,1)-(27,20,2,21)-(25,15,1,31)-(25,10,2,37)-(27,7,1,46) ซึ่งจุดควบคุมเส้นทางทั้งหมดอยู่ห่างกันไม่มาก เช่นเดียวกัน แต่มีระยะเวลาระหว่างจุดควบคุมเส้นทางห่างกันค่อนข้างมาก เช่นเดียวกับในเหตุการณ์ก่อนหน้า ทำให้เหตุการณ์ที่กำหนดสามารถเกิดขึ้นจริงได้ยาก ผลการค้นหาที่ดีที่สุดสำหรับเหตุการณ์นี้จึงมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดเป็น 59.47 และมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางเป็น 4.04

สำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำนั้น ไม่พบเหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำการค้นหาให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีได้

นอกจากนั้น ขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการทำงานของโปรแกรมในงานวิจัยเดิมเทียบกับที่ใช้ในการทำงานของงานวิจัยนี้ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 16

ตารางที่ 16: ตารางเปรียบเทียบขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการทำงาน

เหตุการณ์	ขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการทำงาน (เมกะไบต์)			
	งานวิจัยเดิม		งานวิจัยนี้	
	CPU	GPU	CPU	GPU
การลามของไฟ	41.71	-	23.2	84
การไหลของน้ำ	8.93	-	23.2	52

จากตาราง ### จะเห็นว่าการค้นหาโดยใช้หน่วยประมวลผลภาพที่ใช้งานวิจัยนี้นั้นจะต้องใช้ขนาดของหน่วยความจำมากกว่าการค้นหาโดยใช้เพียงหน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียวในงานวิจัยเดิม ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่จะใช้งานหน่วยประมวลผลภาพได้นั้นจะต้องทำการผนวกชุดคำสั่งสำหรับใช้งานหน่วยประมวลผลภาพเข้ามาในโปรแกรมด้วย ทำให้โปรแกรมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น จะเห็นได้จากการที่โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้น แม้จะแทบไม่มีการจัดสรรหน่วยความจำจากหน่วยความจำของหน่วยประมวลกลางโดยตรงเลยก็ตาม แต่ขนาดของหน่วยความจำของหน่วยประมวลผลกลางที่ใช้ก็ยังมีขนาดใหญ่ ซึ่งในกรณีของการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำนั้น หน่วยความจำที่ใช้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผลด้วยหน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียวอีกด้วย แต่ในขณะเดียวกัน ขนาดของหน่วยความจำที่ใช้นั้นก็มีขนาดเท่ากันทั้งสำหรับการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟและการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการ

ผนวกชุดคำสั่งสำหรับใช้งานหน่วยประมวลผลภาพเข้ามาในโปรแกรม นอกจากนั้น ในส่วนของขนาดของหน่วยความจำของหน่วยประมวลผลภาพที่ใช้นั้นจะแตกต่างกันไปตามประเภทของเหตุการณ์ที่ทำการค้นหา ทั้งนี้เพราะจำนวนค่าสมบัติที่ต้องทำการปรับสำหรับเหตุการณ์แต่ละแบบนั้นมีไม่เท่ากัน โดยค่าสมบัติที่ต้องทำการปรับสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ ได้แก่ อุณหภูมิ มวล ค่าความเสียหาย ความชื้น ค่าลักษณะของพื้นที่ ซึ่งมีขนาดรวมกันเท่ากับ 20 ไบต์ต่อ 1 เซลล์หรือยีน และค่าสมบัติที่ต้องทำการปรับสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ ได้แก่ ความสูง ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 4 ไบต์ ซึ่งจะมีขนาดของโครโมโซมเป็นไปตามตารางที่ 17

ตารางที่ 17: ตารางแสดงหน่วยความจำที่ใช้สำหรับยีนและโครโมโซม

เหตุการณ์	ขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ (ไบต์)			
	ยีน	โครโมโซม	ประชากร 1000 ตัว (1 รุ่น)	ประชากร 2000 ตัว (2 รุ่น)
การลามของไฟ	20	20480	20480000	40960000
การไหลของน้ำ	4	4096	4096000	8192000

ในการค้นหานั้น ในขณะหนึ่งๆ จะต้องทำการจัดสรรหน่วยความจำเพื่อให้มีขนาดพอเพียงกับการเก็บประชากรจำนวน 2 รุ่นเสมอเพื่อใช้ในขั้นตอนของการสร้างกลุ่มประชากรใหม่ของรุ่นถัดไป โดยพื้นที่สำหรับประชากร 1 รุ่นนั้น จะถูกใช้สำหรับการเก็บประชากรในรุ่นปัจจุบัน และพื้นที่สำหรับประชากรอีก 1 รุ่นที่เหลือนั้น จะถูกใช้สำหรับการเก็บประชากรที่ถูกสร้างขึ้นใหม่สำหรับเป็นประชากรในรุ่นถัดไป ซึ่งจากตารางที่ 16 และตารางที่ 17 จะเห็นได้ว่าหน่วยความจำที่ใช้ในส่วนของการคำนวณต่างๆ ของโปรแกรมนั้น สำหรับการคำนวณบนหน่วยประมวลผลกลางจะมีขนาดประมาณ 0.75 เมกะไบต์สำหรับทั้งการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟและการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ แต่ในขณะเดียวกัน สำหรับการคำนวณบนหน่วยประมวลผลภาพนั้น จะพบว่ามีส่วนต่างของหน่วยความจำที่ใช้สำหรับทั้งการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟและเหตุการณ์การไหลของน้ำเป็นขนาดประมาณ 43 เมกะไบต์ ซึ่งจากการสังเกตและการทดลองโดยเรียกใช้หน่วยประมวลผลภาพโดยทำเพียงแค่การจัดสรรหน่วยความจำขนาด 4096 ไบต์โดยไม่มีการคำนวณใดๆ นั้น ก็พบว่ามีการใช้งานหน่วยความจำของหน่วยประมวลผลภาพถึง 43 เมกะไบต์แล้ว ซึ่งหน่วยความจำที่ใช้ในส่วนนี้น่าจะเป็นส่วนของชุดคำสั่งที่จำเป็นสำหรับการควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลภาพ ทำให้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้งานหน่วยความจำในส่วนนี้ที่จำเป็นต้องใช้เพิ่มขึ้นจากหน่วยความจำที่ถูกทำการจัดสรรด้วยโปรแกรมได้ ซึ่งในส่วนของหน่วยความจำที่ต้องใช้เพิ่มเติมจากนั้น จากการสังเกตและทดลองเพิ่มเติมกับโปรแกรมตัวอย่าง

อื่นๆ ของ CUDA ก็พบว่าได้ผลในลักษณะเดียวกัน คือ เมื่อเริ่มมีการใช้งานหน่วยประมวลผลภาพ ขนาดของหน่วยความจำของหน่วยประมวลผลภาพที่ใช้ก็จะเพิ่มขึ้นประมาณ 43 เมกะไบต์ทันที แม้ว่าคำสั่งที่เรียกใช้งานจะไม่ใช่คำสั่งสำหรับทำการจัดสรรหน่วยความจำก็ตาม

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพและการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดมาใช้เพื่อปรับปรุงการทำงานของโปรแกรมกำหนดสมบัติของพื้นที่บนแผนที่ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองแบบอัตโนมัติให้รองรับการทำงานกับแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนั้นยังได้ทำการปรับแก้กฎการเปลี่ยนสถานะต่างๆ ของเซลล์เพื่อลดความบกพร่องในการทำงานลง และเพื่อให้เหตุการณ์ต่างๆ สามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วมากขึ้นเป็นระยะทางไกลขึ้น และทำการปรับแก้การกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาดีขึ้น

การนำการคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพมาใช้นั้น เมื่อทำการคำนวณด้วยกฎที่ใช้ในงานวิจัยเดิม ทำให้การค้นหาเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้น โดยเร็วขึ้น 3.02 เท่าสำหรับการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ โดยมีระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการค้นหาคือ 461.64 วินาที และเร็วขึ้น 1.24 เท่าสำหรับการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ โดยมีระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการค้นหาคือ 370.30 วินาที แต่ในด้านของขนาดของหน่วยความจำที่ใช้นั้น งานวิจัยนี้จะใช้หน่วยความจำของหน่วยประมวลผลกลางเป็นขนาดค่อนข้างคงที่ที่ 23 เมกะไบต์ แต่จะใช้หน่วยความจำของหน่วยประมวลผลภาพเป็นขนาดแตกต่างกันไปตามประเภทของเหตุการณ์ที่ทำการค้นหา โดยใช้ 84 เมกะไบต์สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ และ 52 เมกะไบต์สำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ ซึ่งเมื่อรวมขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ทั้งหมดแล้ว จะมีขนาดมากกว่าหน่วยความจำที่ใช้เมื่อทำการค้นหาโดยใช้หน่วยประมวลผลกลางเพียงอย่างเดียว เนื่องจากว่าในการใช้งานหน่วยประผลภาพนั้นจะต้องทำการผนวกคลังคำสั่งในการใช้งานหน่วยประมวลผลภาพเข้ามาในโปรแกรมด้วย จึงทำให้โปรแกรมมีขนาดใหญ่ขึ้น และในการทำงานของหน่วยประมวลผลภาพนั้น ก็จำเป็นจะต้องมีหน่วยความจำที่ใช้สำหรับชุดคำสั่งสำหรับการควบคุมการทำงาน ทำให้ขนาดของหน่วยความจำที่ต้องใช้มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

การปรับแก้การกลายพันธุ์และการไขว้เปลี่ยนของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟนั้น เมื่อไม่ใช้การกลายพันธุ์และทำการปรับแก้วิธีการไขว้เปลี่ยนในส่วนของค่าลักษณะของพื้นที่ให้ทำการสุ่มเลือกค่าลักษณะของพื้น

จากเซลล์ที่นำมาทำการไขว้เปลี่ยน จะให้ผลการค้นหาที่ดีขึ้น โดยค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงเพิ่มจาก 39.76 เป็น 67.43

การนำการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดมาใช้นั้น สำหรับเหตุการณ์การลามของไฟจะให้ผลการค้นหาที่ดีที่สุดเมื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 60 รุ่น และใช้วิธีการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชันแล้วทำการค้นหาต่ออีก 100 รุ่น โดยมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงเป็น 78.73 และมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางเป็น 6.21 และมีระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการค้นหาคือ 361.36 วินาที สำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำจะให้ผลการค้นหาที่ดีที่สุดเมื่อทำการค้นหาที่ระดับความละเอียดครึ่งหนึ่งเป็นจำนวน 100 รุ่น และใช้วิธีการเพิ่มระดับความละเอียดด้วยวิธีการเพิ่มระดับความละเอียดโดยตรงแล้วทำการค้นหาต่ออีก 100 รุ่น โดยมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงเป็น 93.08 และมีค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางเป็น 5.68 และมีระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการค้นหาคือ 220.34 วินาที ซึ่งจากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดช่วยให้การค้นหาได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นจริง

ในการทดลองพบเหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำการค้นหาให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ได้ โดยพบว่าการที่การค้นหาสำหรับเหตุการณ์เหล่านั้นไม่สามารถให้ผลที่ดีได้นั้น มีสาเหตุมาจากการที่เหตุการณ์เหล่านั้นสามารถเกิดขึ้นได้ยาก โดยเหตุการณ์ดังกล่าวประกอบด้วยเหตุการณ์การลามของไฟที่ระยะทางไกลและมีระยะเวลาจำกัดอย่างมาก ซึ่งการที่จะเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวได้นั้นการลามของไฟจะต้องเกิดอย่างรวดเร็วและต้องเกิดการเผาไหม้ของเซลล์ข้างเคียงขึ้นแทบทุกหน่วยเวลาอย่างต่อเนื่องไม่หยุด และเหตุการณ์อีกแบบหนึ่ง คือ เหตุการณ์การลามของไฟที่ระยะทางใกล้แต่มีระยะเวลาระหว่างจุดควบคุมเป็นระยะเวลานานทำให้การลามของไฟนั้นจำเป็นต้องเป็นไปอย่างช้ามากเท่านั้น เพราะเป็นการยากที่จะเกิดการเผาไหม้ที่เซลล์หนึ่งๆ อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเซลล์จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเกิดการเผาไหม้ขึ้นที่เซลล์หนึ่งๆ ได้อย่างต่อเนื่องเพียง 3-4 หน่วยเวลาเท่านั้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับแผนที่ขนาดกว้าง 32 เซลล์ ยาว 32 เซลล์ ซึ่งเท่ากับขนาดของแผนที่ที่มีขนาดเล็กที่สุดที่มีการใช้งานในเกมเท่านั้น ในขณะที่แผนที่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่มีการใช้งานในเกมคือกว้าง 256 เซลล์ ยาว 256 เซลล์ ดังนั้นจึงควรมีการทดลองขยายผลเพิ่มเติมเพื่อให้เครื่องสามารถรองรับการทำงานกับแผนที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้แผนที่ที่รองรับมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของแผนที่ที่มีการใช้งานจริง สำหรับการนำไปทดลองขยาย

ผลนั้น วิธีการค้นหาที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปปรับใช้ต่อได้โดยตรง แต่ควรทำการแก้ไขปรับปรุงข้อจำกัดของกฎการไหลของน้ำตามที่จะกล่าวถึงต่อไป

ในด้านกฎการเปลี่ยนสถานะของเซลล์นั้น แม้ว่ากฎที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำให้การเกิดของเหตุการณ์เป็นไปอย่างต่อเนื่องและทันเวลาสำหรับให้ใช้กับแผนที่ในเกมได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดบางอย่างอยู่ในเรื่องของกฎการไหลของน้ำ ที่เซลล์จะหยุดการเพิ่มของน้ำเมื่อเซลล์รอบข้างทุกเซลล์มีน้ำแล้วแม้ว่าเซลล์ดังกล่าวจะยังไม่มีการถ่ายเทน้ำไปให้เซลล์ข้างเคียงใดๆ ก็ตาม ซึ่งถ้าหากเกิดสถานการณ์ดังกล่าวขึ้นกับเซลล์ทุกเซลล์ที่อยู่สุดทางของการไหลของน้ำ จะทำให้หลังจากนั้นแม้ว่าจะมีการพยายามเพิ่มน้ำเข้ามาในระบบอย่างต่อเนื่องจากวัตถุต้นกำเนิดน้ำ แต่ก็จะไม่มีการเพิ่มปริมาณน้ำในเซลล์ใดๆ ขึ้นอีก ซึ่งสถานการณ์นี้ขัดต่อหลักความจริงที่ควรจะมีน้ำเพิ่มขึ้นในระบบอย่างต่อเนื่อง ดังตัวอย่างในภาพที่ 46 เมื่อ F แสดงถึงค่าปริมาณน้ำในเซลล์และ H แสดงถึงค่าความสูงของเซลล์ และให้เซลล์ทุกเซลล์ที่อยู่ล้อมรอบเซลล์ในภาพทั้งหมดมีค่าความสูงเท่ากับ 1000 หน่วยและไม่มีน้ำอยู่ จากข้อจำกัดนี้ จึงสมควรที่จะทำการแก้ไขโดยทำการตรวจสอบเซลล์ที่เป็นจุดปลายทางการไหลของน้ำในทุกรอบการคำนวณเพื่อหลีกเลี่ยงสถานการณ์ดังกล่าว โดยถ้าหากตรวจพบก็ควรจะทำการเพิ่มปริมาณน้ำให้กับเซลล์ทุกเซลล์ที่มีน้ำในขณะนั้น หรือทำการปรับปรุงกฎที่ใช้ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องคำนึงถึงการนำมาใช้งานในเกมด้วย โดยเหตุการณ์ต่างๆ ควรจะสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและทันเวลา และสามารถเกิดขึ้นได้บนระยะทางที่ไกลในระดับหนึ่งด้วยเช่นกัน

ภาพที่ 46: ตัวอย่างสถานการณ์แสดงข้อจำกัดของกฎการไหลของน้ำ

การนำสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองในงานวิจัยนี้ไปใช้ในเกมนั้น สามารถนำไปใช้กับเกมที่อนุญาตให้ผู้เล่นมีปฏิสัมพันธ์และส่งผลกระทบกับสภาพแวดล้อมได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการปรับแต่งในกรณีที่แผนที่ที่ใช้มีขนาด 32x32 เซลล์ แต่ก็ควรจะต้องทำการกำหนดระยะเวลาจริงให้กับระยะเวลา 1 หน่วยในการจำลองเหตุการณ์ของสภาพแวดล้อมแบบปรากฏขึ้นเองให้สอดคล้องกับการดำเนินไปของเหตุการณ์ที่มีในเกมนั้นๆ ด้วย เพื่อให้เหตุการณ์ทั้งหมดยังคงปรากฏขึ้นภายในระยะเวลา 50 หน่วยเวลาในการจำลองเหตุการณ์ หรืออาจจะแบ่งเหตุการณ์ออกเป็นช่วงๆ โดยให้แต่ละช่วงมีระยะเวลาไม่เกิน 50 หน่วยเวลาในการจำลองเหตุการณ์ก็ได้ แต่ทั้งนี้ควรจะไม่มีการทับซ้อนกันของเซลล์ที่เกิดเหตุการณ์ต่างๆ ดังกล่าว เนื่องจากเหตุการณ์บางอย่างอาจไม่สามารถเกิดได้ เช่น เหตุการณ์ที่ต้องการให้เกิดการติดไฟขึ้นซ้ำที่เซลล์เดิมที่เคยติดไฟและมอดไปแล้ว ซึ่งไม่สามารถเกิดได้ หรือเหตุการณ์ที่ต้องการให้เกิดการลามของไฟขึ้นโดยมีเซลล์ที่ต้องการให้เกิดการไหลของน้ำผ่านเซลล์นั้นในเวลาก่อนหน้าที่จะเกิดการลามของไฟ ซึ่งถ้าหากเซลล์ดังกล่าวมีการไหลของน้ำเกิดขึ้นจริง การลามของไฟก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นตามที่ต้องการได้ สำหรับการนำไปใช้กับแผนที่ที่มีขนาดมากกว่า 32x32 เซลล์นั้น งานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมถึงการทำงานดังกล่าว จึงควรทำการทดลองและปรับปรุงเพิ่มเติมก่อนที่จะนำไปใช้ แต่ในส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องใช้นั้น สำหรับการค้นหาบนแผนที่ขนาด 256x256 นั้นจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำของหน่วยประมวลผลภาพอย่างน้อย

2.8GB โดยประมาณ ซึ่งหน่วยประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน่วยความจำเพียง 2GB จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ แต่ในปัจจุบันได้มีหน่วยประมวลผลภาพ Nvidia GeForce GTX Titan ซึ่งมีหน่วยความจำขนาด 6GB วางขายในตลาดแล้ว ถ้าหากเปลี่ยนมาใช้หน่วยประมวลผลภาพรุ่นนี้แทนก็จะไม่มีปัญหาในด้านของหน่วยความจำที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการค้นหาด้วยประชากรขนาด 1000 ตัวต่อรุ่นบนแผนที่ขนาด 256x256

รายการอ้างอิง

[1] Sweetser, P. and Wiles, J. Scripting versus Emergence Issues for Game Developers and Players in Game Environment Design. In International Journal of Intelligent Games and Simulations, pp.1-9. 2005.

[2] Kotrajaras, V. and Kumnoonsate T. Fine-tuning Parameters for Emergent Environments in Games Using Artificial Intelligence. In International Journal of Computer Games Technology. 2009.

[3] Weisstein, E.W. Cellular Automaton [Onlne]. 2006. MathWorld -- A Wolfram Web Resource. Available from : http://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html [2013,April 10]

[4] Wikimedia Commons. Image:Torus.jpg [Onlne]. 2006. Wikimedia Commons. Available from : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Torus.jpg [2006,August 19]

[5] Holland, J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Michigan: The University of Michigan Press, 1975.

[6] Cootes, T.F., Taylor, C.J., Cooper, D.H., and Graham, J. Active shape models - their training and application. In Computer Vision and Image Understanding, pp.38-59. 1995.

[7] Wikimedia Foundation, Inc. Bilinear interpolation [Online]. 2013. Available from : http://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear_interpolation [2013,March 31]

[8] Wikimedia Foundation, Inc. Linear interpolation [Online]. 2013. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_interpolation [2013,March 31]

[9] Wikimedia Foundation, Inc. Bicubic interpolation [Online]. 2013. Available from: http://www.paulinternet.nl/?page=bicubic [2013,March 31]

[10] Forsyth, T. Cellular Automata for Physical Modelling. In Treglia, D. (ed.), Game Programming Gems 3, pp.200-214. Massachusetts : Charles River Media, Inc. 2002.

[11] Babbar, M., Minsker, B. A Multiscale Master-Slave Parallel Genetic Algorithm with Application to Groundwater Remediation Design. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, pp.9-16. 2002.

[12] Pan, J., et al. 2D Multi-Scale Hybrid Optimization Method for Geophysical Inversion and Its Application. In Applied Geophysics, pp.337-348. 2009.

[13] NVIDIA Corporation. Nvidia [Online]. 2013. Available from : http://www.nvidia.com/page/home.html [2013,March 31]

[14] NVIDIA Corporation. CUDA [Online] 2013. Available from : http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html [2013,March 31]

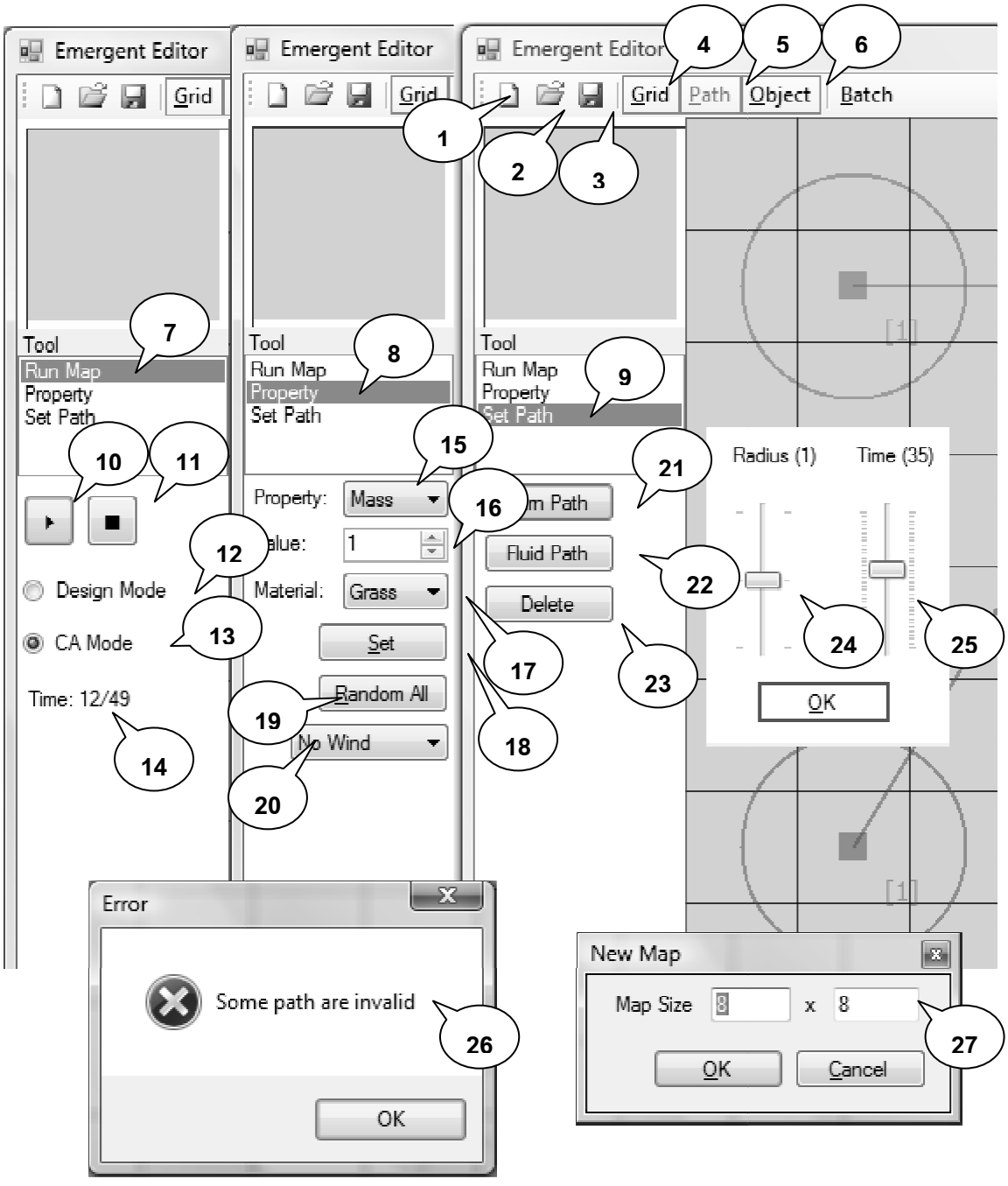
[15] Wikimedia Foundation, Inc. C programming language [Online]. 2013. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/ C_(programming_language) [2013,March 31]

[16] NVIDIA Corporation. CUDA Toolkit Documentation [Online]. 2013. Available from: http://docs.nvidia.com/cuda/ cuda-c-programming-guide/index.html [2013,March 31]

ภาคผนวก

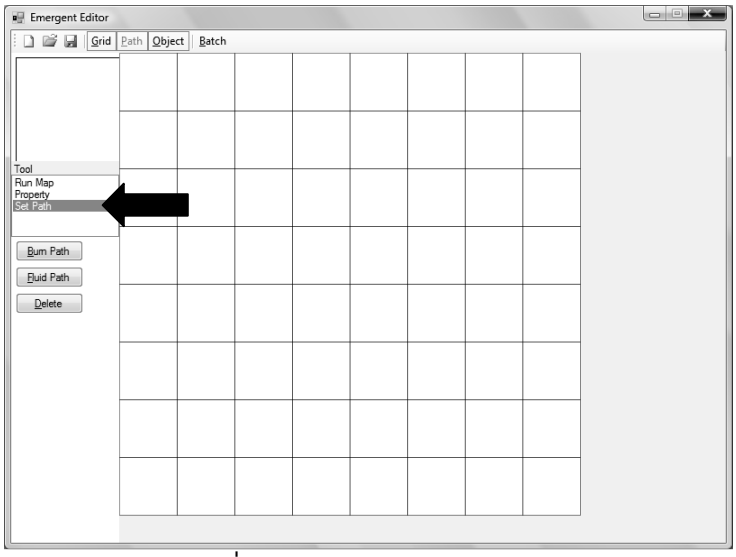
ภาคผนวก ก วิธีการใช้งานโปรแกรมกำหนดสมบัติของพื้นที่

เครื่องมือกำหนดสมบัติของพื้นที่ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆดังภาพที่ 47 และมีวิธีการใช้งานดังนี้



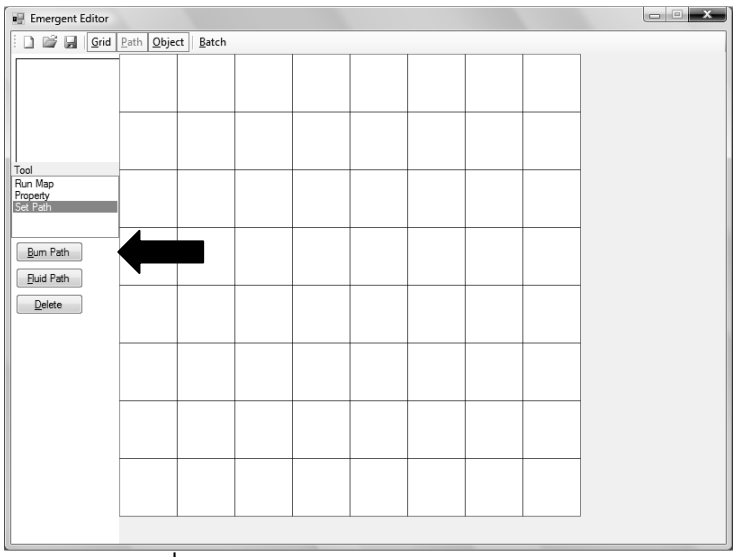
ภาพที่ 47: ส่วนต่าง ๆของเครื่องมือกำหนดสมบัติของพื้นที่

1. ผู้ใช้สามารถสร้าง / ลบ / แก้ไข จุดควบคุมเส้นทางในส่วนกำหนดจุดควบคุมเส้นทาง โดยเลือกหัวข้อ “Set Path” (9) ดังภาพที่ 48



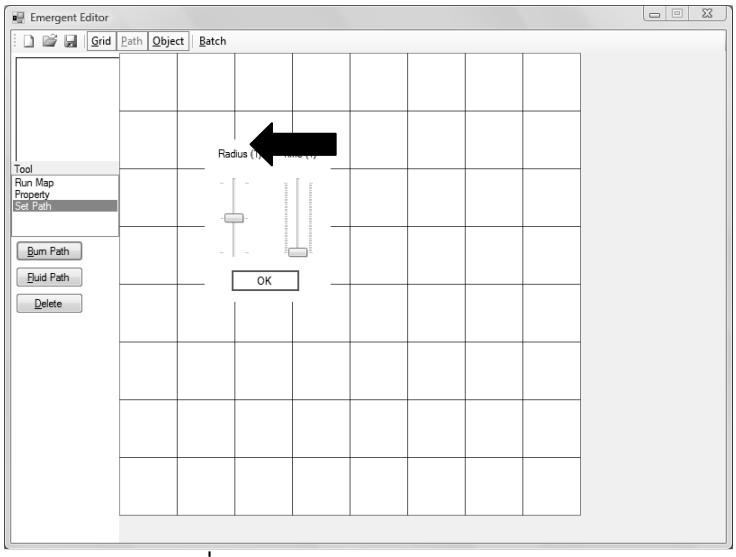
ภาพที่ 48: เลือกหัวข้อ “Set Path”

2. ผู้ใช้เลือกชนิดของเหตุการณ์ของเส้นทางที่จะสร้าง โดยการคลิกปุ่ม “Burn Path” (21) เพื่อเลือกสร้างเส้นทางการลามของไฟ ซึ่งจะแสดงเป็นเส้นสีแดง หรือ “Fluid Path” (22) เพื่อเลือกสร้างเส้นทางการไหลของน้ำ ซึ่งจะแสดงเป็นเส้นสีฟ้า โดยในภาพที่ 49 จะแสดงการเลือกสร้างเส้นทางการลามของไฟ



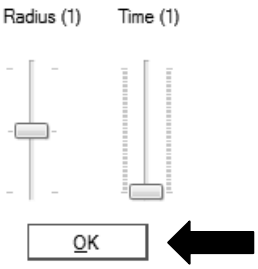
ภาพที่ 49: เลือกสร้างเส้นทางการลามของไฟ

3. ผู้ใช้กำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมเส้นทาง โดยการคลิกตำแหน่งที่ต้องการบนแผนที่ โดยในภาพที่ 50 จะแสดงการสร้างจุดควบคุมเส้นทางที่ตำแหน่ง (1,1)



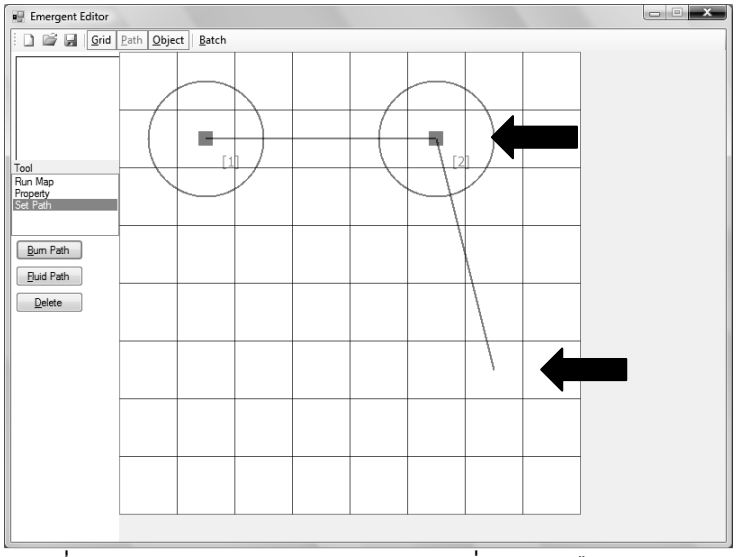
ภาพที่ 50: การสร้างจุดควบคุมเส้นทาง

4. ผู้ใช้กำหนดขนาดรัศมีของจุดควบคุมเส้นทาง (24) และเวลาที่จะเกิดเหตุการณ์ที่จุดนั้น (25) โดยการเลื่อนแถบกำหนดขนาดที่ขึ้นมาให้เลือก และกดปุ่ม “OK” โดยในภาพที่ 51 จะกำหนดขนาดรัศมีที่ 1 หน่วย และเวลาเป็น 1 หน่วย



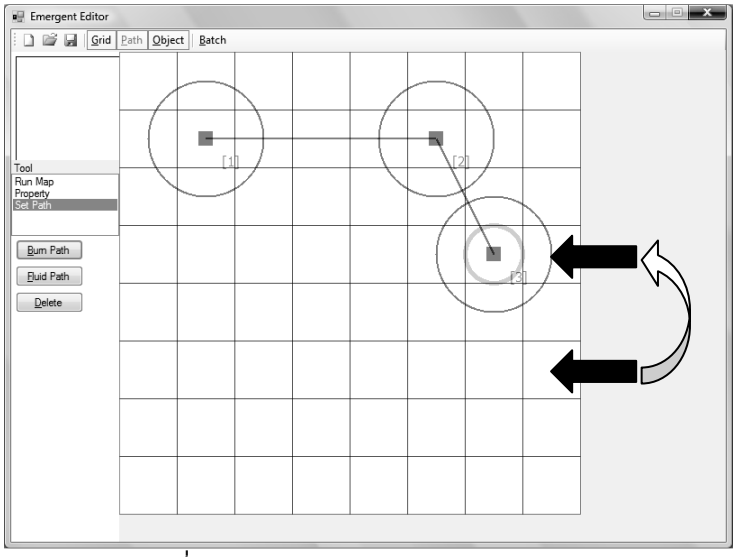
ภาพที่ 51: กำหนดขนาดรัศมี และเวลาของจุดควบคุมเส้นทาง

5. ผู้ใช้กำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมเส้นทางถัดไป โดยใช้วิธีเดียวกับข้อ 2 หรือปิดเส้นทาง โดยการคลิกขวา โดยในภาพที่ 52 หากคลิกจะเป็นการสร้างควบคุมเส้นทางที่ตำแหน่ง (6,5) แต่ถ้าคลิกขวาจะเป็นการปิดเส้นทาง ทำให้เป็นเส้นทางที่มีจุดควบคุม 2 จุด



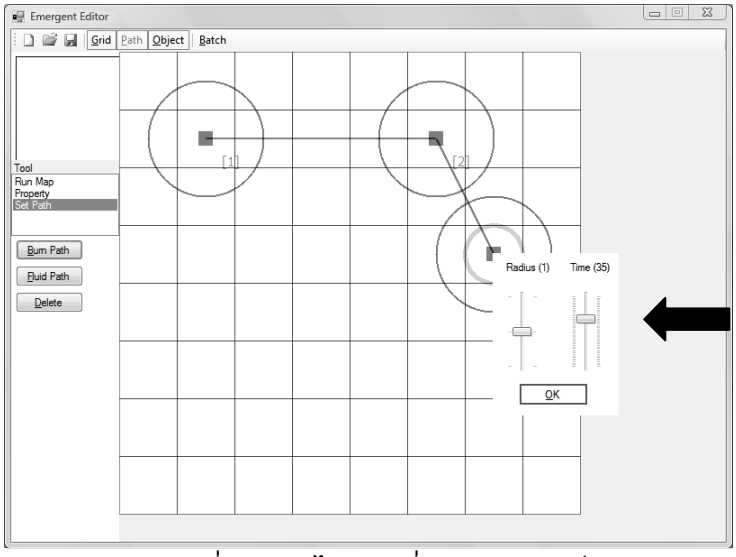
ภาพที่ 52: การสร้างจุดควบคุมเส้นทางเพิ่มเติม หรือปิดเส้นทาง

6. ผู้ใช้สามารถเลือกจุดควบคุมเส้นทางเพื่อย้ายตำแหน่ง โดยการลากจุดควบคุมเส้นทางไปยังตำแหน่งใหม่ โดยในภาพที่ 53 จะย้ายจุดควบคุมที่ 3 ไปที่ตำแหน่ง (6,3)



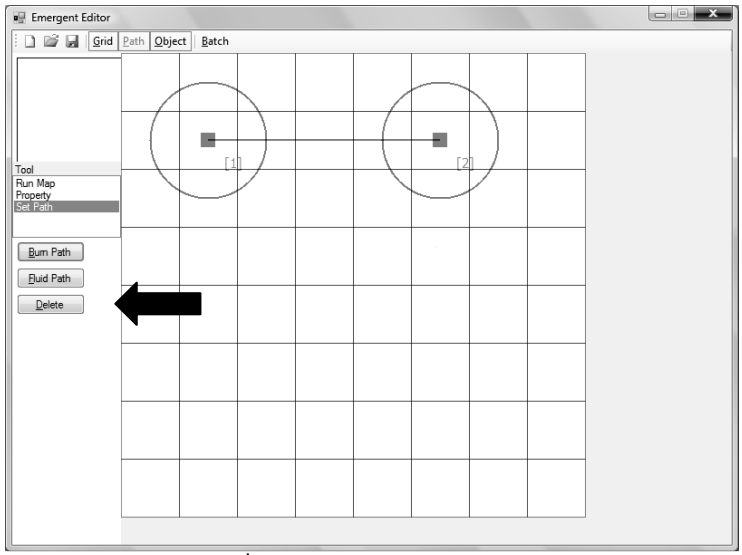
ภาพที่ 53: ย้ายตำแหน่งจุดควบคุมเส้นทาง

7. ผู้ใช้สามารถเลือกจุดควบคุมเส้นทางเพื่อแก้ไขขนาดรัศมี และเวลา โดยการคลิกขวาที่จุดควบคุมเส้นทาง แล้วเลื่อนแถบกำหนดขนาด และเวลาที่ขึ้นมา และกดปุ่ม “OK” โดยในภาพที่ 54 จะแก้ไขเวลาที่เกิดเหตุการณ์ของจุดควบคุมที่ 3 เป็น 35 หน่วย



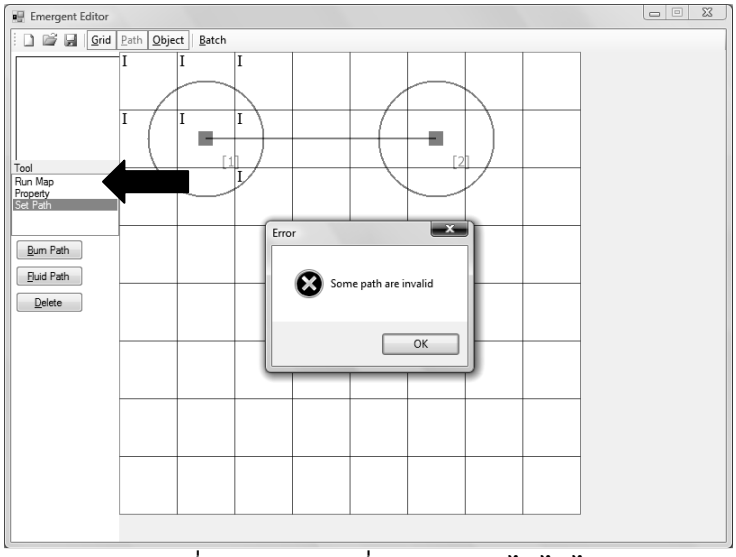
ภาพที่ 54: แก้ไขเวลาที่เกิดเหตุการณ์

8. ผู้ใช้สามารถลบจุดควบคุมเส้นทางได้ โดยการคลิกจุดควบคุมเส้นทาง แล้วคลิกปุ่ม “Delete” (23) โดยในภาพที่ 55 จะลบจุดควบคุมที่ 3



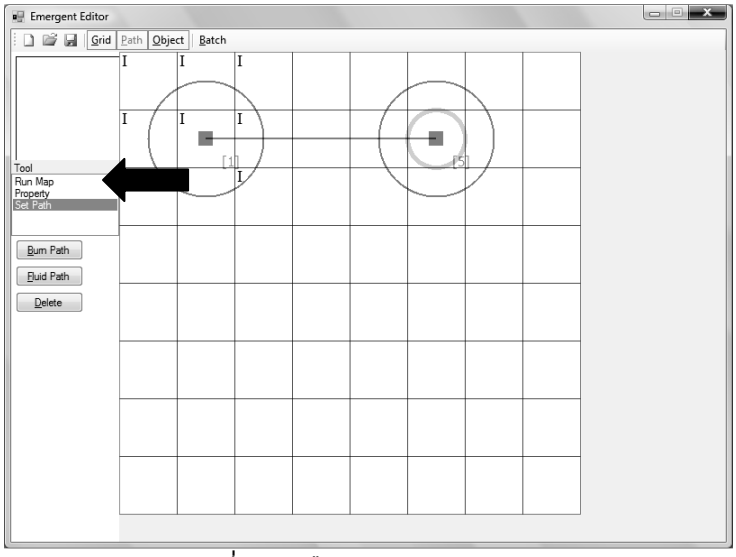
ภาพที่ 55: ลบจุดควบคุมเส้นทาง

9. เมื่อผู้ใช้ออกจากส่วนกำหนดจุดควบคุมเส้นทาง จะมีตัวอักษร “I” แสดงถึงจุดกำเนิดไฟ และ “C” แสดงถึงจุดกำเนิดน้ำ ถ้าเส้นทางที่กำหนดเป็นไปไม่ได้ เครื่องมือจะเตือนว่า “Some path are invalid” (26) ดังภาพที่ 56 ให้กดปุ่ม “OK” และแก้ไขเส้นทางโดยใช้วิธีในข้อ 5 และ 6



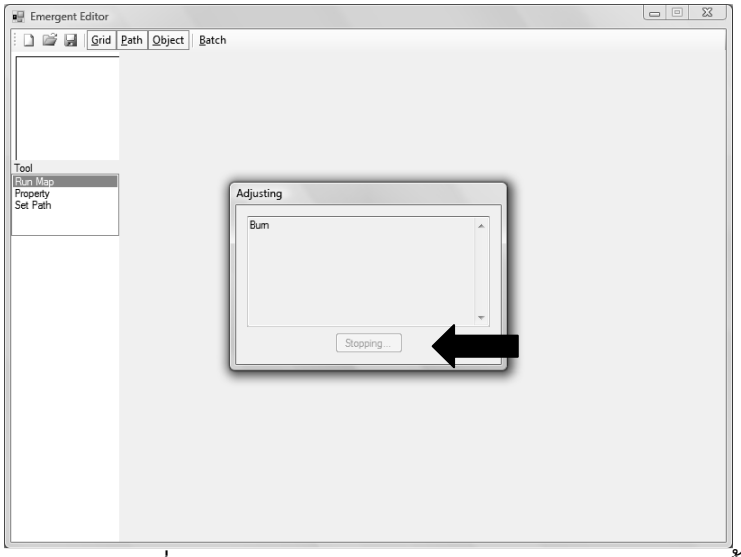
ภาพที่ 56: เส้นทางที่กำหนดเป็นไปไม่ได้

10. ผู้ใช้ออกจากส่วนกำหนดจุดควบคุมเส้นทางโดยเลือกหัวข้อ “Run Map” (7) เพื่อไปยัง ส่วนแสดงเหตุการณ์ หรือเลือกหัวข้อ “Property” (8) เพื่อไปยังส่วนแสดงสมบัติของแผนที่ โดยในภาพที่ 57 จะแสดงการเลือกหัวข้อ “Run Map”



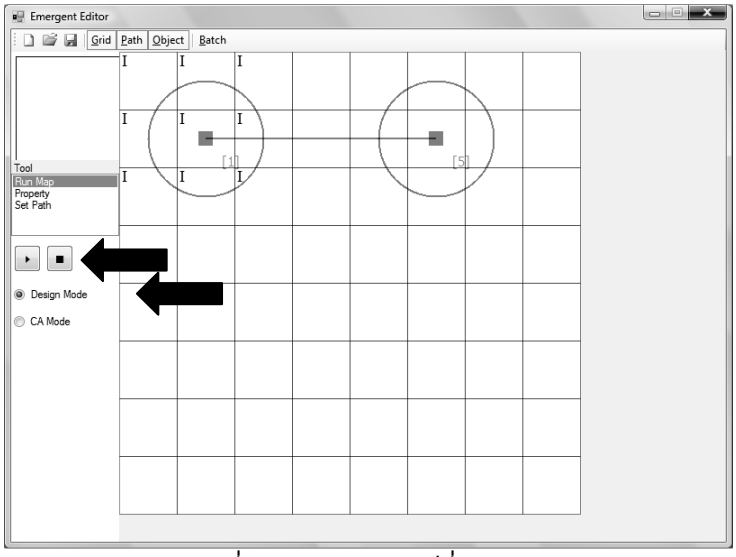
ภาพที่ 57: เลือกหัวข้อ “Run Map”

11. ส่วนกำหนดสมบัติของพื้นที่แบบอัตโนมัติจะกำหนดสมบัติของพื้นที่ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ เมื่อผู้ใช้ออกจากส่วนกำหนดจุดควบคุมเส้นทาง โดยจะทำงานจนกว่าจะครบจำนวนรอบที่กำหนด หรือจนกว่าผู้ใช้สั่งให้หยุด โดยการคลิกปุ่ม ”Stop” และเมื่อผู้ใช้ดูข้อมูลการทำงานเสร็จแล้วให้กดปุ่ม “OK” โดยในภาพที่ 58 จะสั่งให้หยุดการทำงาน



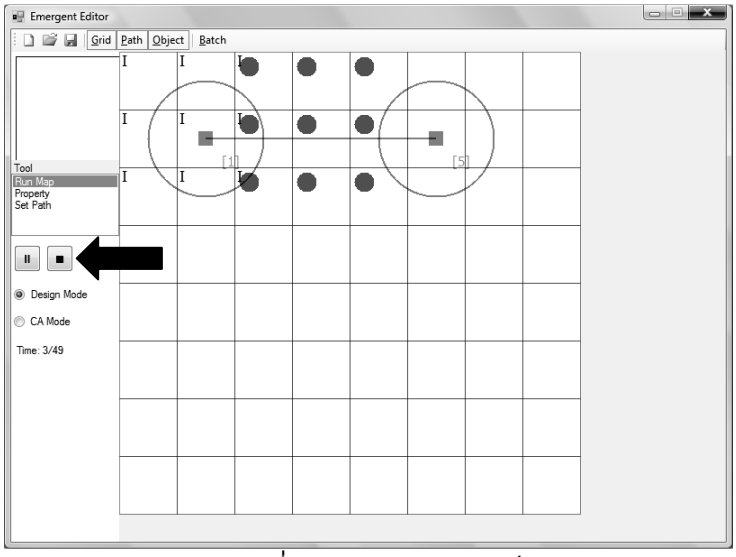
ภาพที่ 58: หยุดการทำงานของส่วนกำหนดสมบัติของพื้นที่

12. ในส่วนแสดงเหตุการณ์ผู้ใช้สามารถดูเหตุการณ์ที่ออกแบบตามจุดควบคุมเส้นทาง โดยการเลือก “Design Mode” (12) หรือดูเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงตามสมบัติของพื้นที่ในส่วนแสดงเหตุการณ์ โดยการเลือก “CA Mode” (13) จากนั้นคลิกปุ่ม “ ▶ ” (10) เพื่อแสดงเหตุการณ์ โดยแทนด้วยวงกลมสีแดงถ้าเซลล์ติดไฟ และสีฟ้าถ้าเซลล์มีน้ำ ซึ่งขนาดของวงกลมจะแสดงถึงเหตุการณ์ว่าเกิดมากน้อยเพียงใด โดยในภาพที่ 59 จะแสดงการดูเหตุการณ์ที่ออกแบบ



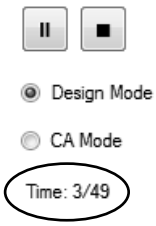
ภาพที่ 59: ดูเหตุการณ์ที่ออกแบบ

13. ในขณะที่แสดงเหตุการณ์อยู่ผู้ใช้สามารถคลิกปุ่ม “ ⏸ ” (10) (ปุ่มเดียวกับ “ ▶ ”) เพื่อหยุดเหตุการณ์ หรือคลิกปุ่ม “ ■ ” (11) เพื่อจบการแสดงเหตุการณ์ โดยในภาพที่ 60 จะหยุดเหตุการณ์



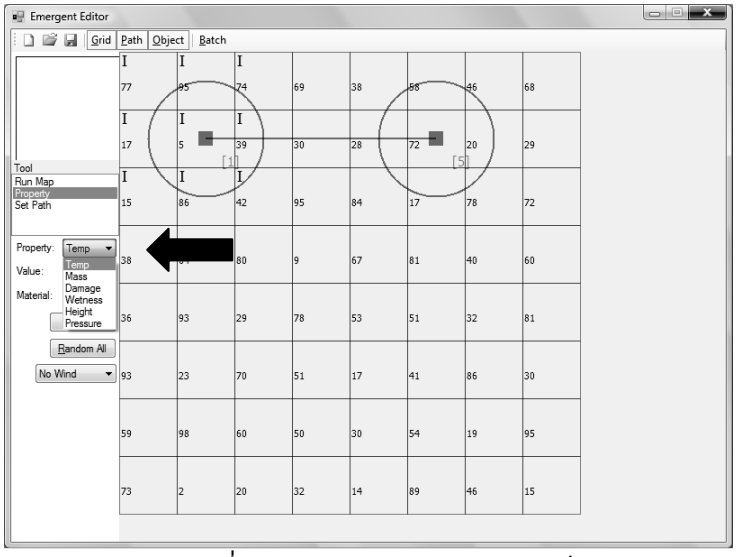
ภาพที่ 60: หยุดเหตุการณ์

14. เครื่องมือจะแสดงเวลาของเหตุการณ์ในส่วน “Time” (14) ดังภาพที่ 61



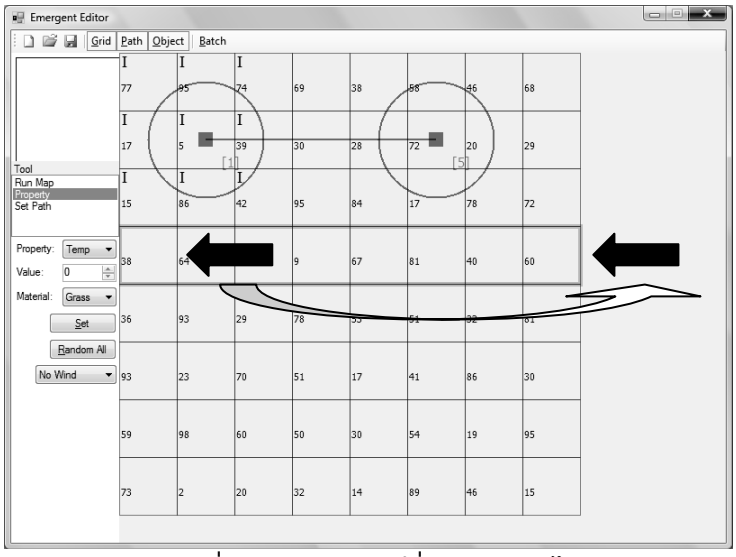
ภาพที่ 61: เวลาของเหตุการณ์

15. ในส่วนแสดงสมบัติของแผนที่ ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของสมบัติที่ต้องการให้แสดงข้อมูลโดยการเลือกตัวเลือกในส่วน “Property” (15) โดยในภาพที่ 62 จะแสดงอุณหภูมิของเซลล์ ซึ่งจะแสดงเป็นตัวเลข และความเข้มของสีในแต่ละเซลล์



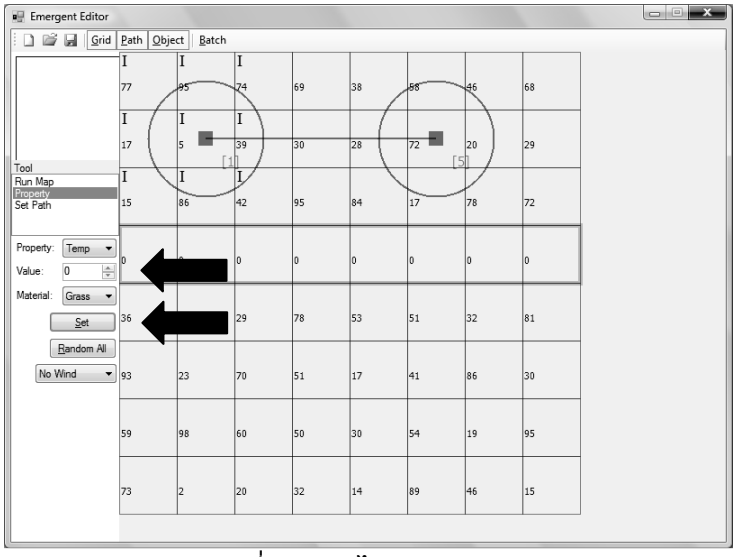
ภาพที่ 62: แสดงอุณหภูมิของเซลล์

16. ผู้ใช้สามารถเลือกเซลล์ที่ต้องการแก้ไข โดยการลากเมาส์ผ่านไปบนเซลล์นั้น โดยในภาพที่ 63 จะเลือกเซลล์ (0,3) ถึง เซลล์ (7,3)



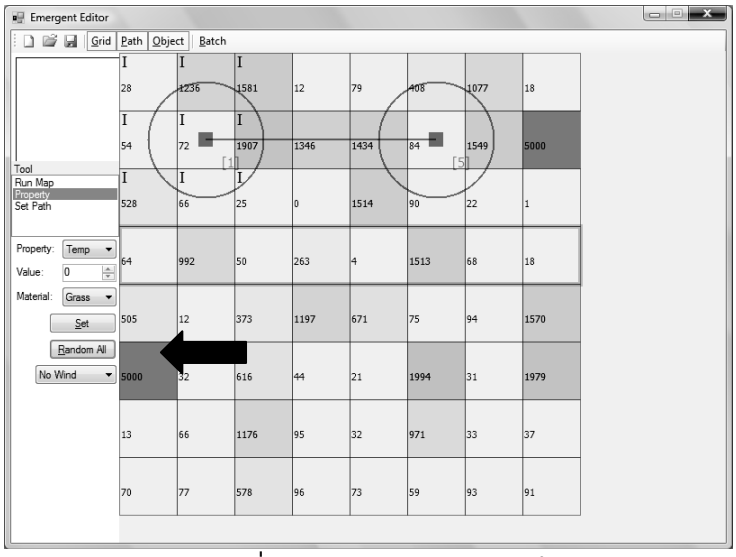
ภาพที่ 63: เลือกเซลล์ที่ต้องการแก้ไข

17. ผู้ใช้สามารถแก้ไขค่าของสมบัติที่เลือกอยู่ของเซลล์ที่เลือกอยู่ โดยการกำหนดค่าใหม่ที่ช่องในส่วน “Value” (16) หรือเลือกตัวเลือกในส่วน “Material” (17) ถ้าต้องการแก้ไขลักษณะของพื้นที่ของเซลล์ที่เลือกอยู่ จากนั้นคลิกปุ่ม “Set” (18) โดยในภาพที่ 64 จะแก้ไขค่าอุณหภูมิของเซลล์ (0,3) ถึง เซลล์ (7,3) เป็น 0



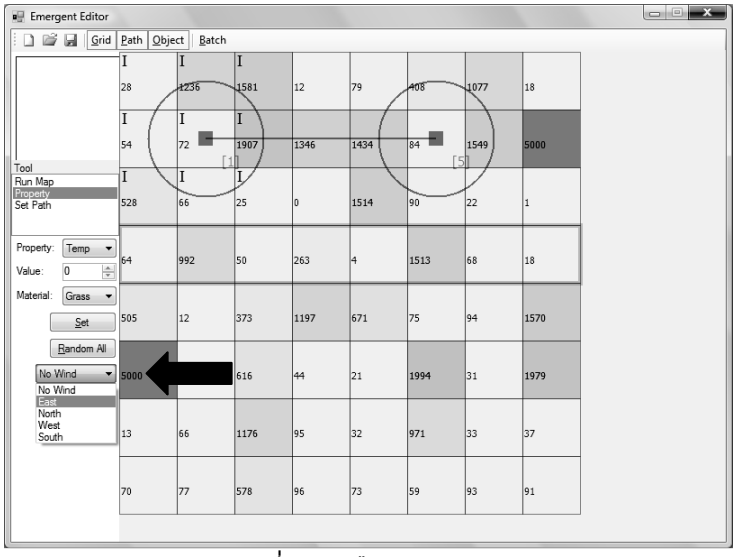
ภาพที่ 64: แก้ไขค่าของสมบัติ

18. ผู้ใช้สามารถสุ่มสมบัติของเซลล์ทั้งหมดบนแผนที่ โดยการคลิกปุ่ม “Random All” (19) ดังภาพที่ 65



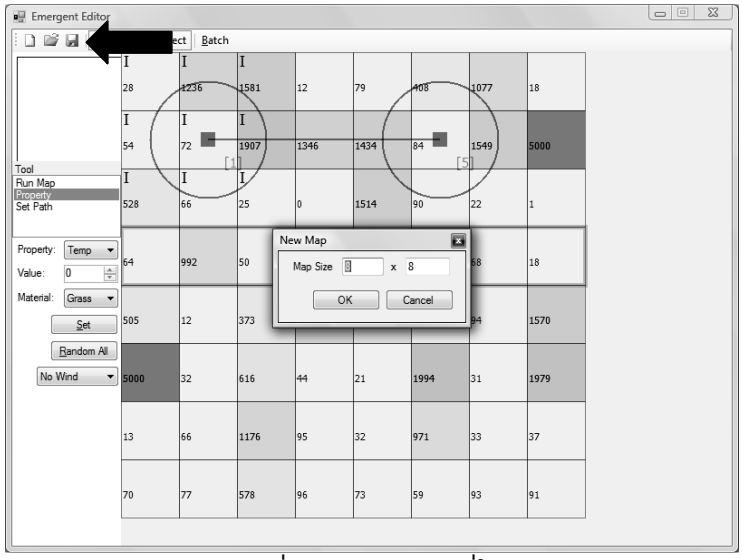
ภาพที่ 65: สุ่มสมบัติของเซลล์

19. ผู้ใช้สามารถเลือกทิศทางลมโดยเลือกตัวเลือกใต้ปุ่ม “Random All” (20) โดยในภาพที่ 66 จะเปลี่ยนทิศทางลมให้พัดไปทางตะวันออก



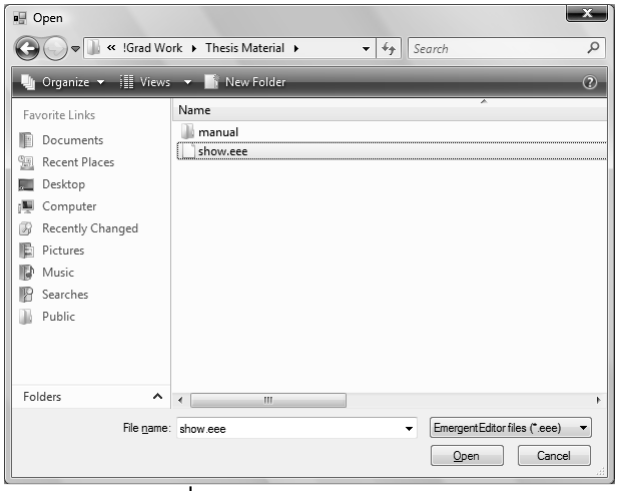
ภาพที่ 66: เลือกทิศทางลม

20. ผู้ใช้สามารถสร้างแผนที่ใหม่โดยคลิกปุ่ม “🗋” (1) จากนั้น ใส่ขนาดของแผนที่ในส่วน “Map Size” (27) จากนั้นคลิกปุ่ม “OK” หรือคลิกปุ่ม “Cancel” ถ้าต้องการยกเลิก ดังภาพที่ 67



ภาพที่ 67: สร้างแผนที่ใหม่

21. ผู้ใช้สามารถเปิดไฟล์แผนที่โดยคลิกปุ่ม “🗁” (2) และบันทึกแผนที่โดยคลิกปุ่ม “🖫” (3) โดยในภาพที่ 68 จะแสดงหน้าต่างการเปิดไฟล์หลังจากคลิกปุ่ม “🗁”



ภาพที่ 68: หน้าต่างการเปิดไฟล์

22. ผู้ใช้สามารถเปิด/ปิดการแสดง เส้นตาราง เส้นทางของเหตุการณ์ และจุดกำเนิดเหตุการณ์ โดยการคลิกปุ่ม “Grid” (4) “Path” (5) และ “Object” (6) ตามลำดับ โดยในภาพที่ 69 จะปิดการแสดง เส้นตาราง เส้นทาง และจุดกำเนิด

ภาพที่ 69: ปิดการแสดง เส้นตาราง เส้นทาง และจุดกำเนิด

ภาคผนวก ข แผนที่ที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดลองโดยละเอียด

ตารางที่ 18: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์ของการลามของไฟที่ใช้ในการทดสอบความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ

รหัสแผนที่	จุดควบคุม (x, y, radius, time)
BS01	(6,30,1,1)-(0,26,2,16)-(12,22,1,36)
BS02	(3,29,2,3)-(2,21,1,20)-(12,18,2,46)
BS03	(23,6,1,2)-(30,4,2,15)-(28,12,2,34)
BS04	(2,10,2,4)-(8,12,1,13)-(9,4,1,33)
BS05	(13,4,2,4)-(15,11,1,12)-(14,13,1,36)
BS06	(11,18,1,4)-(18,16,1,14)-(20,19,1,33)
BS07	(14,1,1,3)-(22,3,2,19)-(20,11,1,32)
BS08	(23,0,2,4)-(21,7,2,19)-(22,11,1,36)
BS09	(8,2,1,1)-(11,8,2,18)-(7,1,2,36)
BS10	(21,3,2,3)-(11,7,1,18)-(6,11,1,41)
BS11	(20,11,2,1)-(16,16,1,20)-(21,14,2,31)-(15,12,1,45)
BS12	(30,11,1,1)-(26,17,1,22)-(20,16,1,33)-(14,15,1,43)
BS13	(0,26,1,1)-(1,18,1,15)-(6,22,2,29)-(13,24,1,40)
BS14	(19,2,2,4)-(15,8,1,18)-(18,16,2,34)-(18,23,1,48)
BS15	(25,7,2,1)-(18,10,1,16)-(13,11,1,28)-(16,18,1,42)
BS16	(0,31,1,3)-(4,25,2,14)-(2,18,2,26)-(10,16,2,39)
BS17	(13,16,1,4)-(19,22,2,17)-(16,14,1,28)-(12,15,2,43)

BS18	(27,26,2,2)-(21,21,1,19)-(18,13,1,32)-(16,18,1,45)
BS19	(11,0,2,1)-(12,4,2,12)-(15,12,1,27)-(21,7,2,44)
BS20	(25,25,1,2)-(18,22,1,14)-(12,23,2,26)-(6,23,1,36)
BS21	(7,21,2,1)-(16,21,1,14)-(17,26,1,26)-(21,19,1,41)
BS22	(5,11,2,3)-(13,14,1,15)-(8,12,1,27)-(12,18,1,44)
BS23	(22,14,1,1)-(17,17,1,12)-(18,24,2,30)-(11,25,2,42)
BS24	(23,1,1,1)-(21,9,1,14)-(16,12,2,26)-(18,5,1,41)
BS25	(1,5,1,3)-(7,10,1,14)-(7,3,2,27)-(5,11,1,45)
BS26	(14,22,1,1)-(12,21,1,9)-(10,24,2,16)-(9,21,2,25)-(13,18,1,39)
BS27	(19,12,1,1)-(16,14,2,12)-(14,16,2,24)-(12,19,1,35)-(10,16,1,45)
BS28	(14,21,2,2)-(17,24,1,14)-(18,22,1,24)-(20,20,1,36)-(16,21,1,48)
BS29	(11,4,2,4)-(14,6,1,15)-(17,9,2,26)-(18,9,2,34)-(18,14,2,45)
BS30	(12,21,1,3)-(9,22,2,10)-(13,22,1,25)-(15,20,1,35)-(11,20,2,49)
BS31	(25,3,2,1)-(30,9,1,14)-(18,4,2,29)-(13,2,2,42)
BS32	(6,13,1,4)-(14,6,2,21)-(13,14,2,36)-(17,20,1,49)
BS33	(21,17,2,1)-(25,11,2,12)-(29,17,1,25)-(23,19,1,39)
BS34	(25,20,2,4)-(19,15,2,18)-(12,18,2,33)-(5,26,1,49)
BS35	(21,24,1,1)-(15,22,1,10)-(23,21,2,25)-(27,19,2,37)
BS36	(27,24,1,2)-(27,19,1,12)-(20,24,2,30)-(16,20,2,40)-(13,21,2,49)
BS37	(28,0,2,1)-(29,5,1,10)-(29,8,2,18)-(22,6,2,33)-(17,9,1,44)

BS38	(29,5,2,2)-(23,7,2,14)-(17,10,1,27)-(17,2,2,39)-(15,4,2,49)
BS39	(8,23,1,3)-(13,19,2,16)-(19,23,2,30)-(16,16,2,44)-(15,15,1,49)
BS40	(10,18,2,2)-(16,15,2,14)-(11,16,2,26)-(10,22,1,38)-(5,20,2,48)
BS41	(31,14,1,4)-(24,11,2,17)-(18,8,1,28)-(14,10,1,38)-(12,14,1,48)
BS42	(28,21,2,1)-(21,19,2,13)-(18,25,2,26)-(13,21,2,37)-(16,17,2,47)
BS43	(8,25,2,3)-(4,22,2,13)-(11,23,1,23)-(15,27,1,35)-(17,21,2,48)
BS44	(25,5,1,1)-(24,5,1,5)-(20,8,1,15)-(14,11,2,27)-(18,15,2,40)
BS45	(1,11,1,1)-(5,15,1,11)-(9,10,2,23)-(19,13,1,38)-(25,17,1,49)
BS46	(8,28,2,3)-(12,22,1,15)-(9,19,2,24)-(17,17,1,38)-(14,14,2,49)
BS47	(19,11,1,2)-(22,2,1,15)-(19,4,2,25)-(23,5,1,35)-(22,7,2,46)
BS48	(19,18,1,4)-(16,16,1,14)-(22,12,2,28)-(31,11,1,43)-(29,11,1,49)
BS49	(1,28,1,1)-(5,22,2,13)-(8,26,1,25)-(4,18,1,40)-(9,19,1,49)
BS50	(27,13,1,1)-(22,16,2,12)-(22,12,2,21)-(20,19,1,34)-(26,17,2,48)

ตารางที่ 19: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์การไหลของน้ำที่ใช้ในการทดสอบความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้การคำนวณแบบขนานบนหน่วยประมวลผลภาพ

รหัสแผนที่	จุดควบคุม (x, y, radius, time)
FS01	(26,31,1,4)-(24,23,1,20)-(20,17,2,35)
FS02	(5,31,1,3)-(10,25,2,20)-(7,17,1,32)
FS03	(4,18,2,2)-(12,23,1,16)-(4,21,2,37)
FS04	(3,16,1,1)-(10,22,2,17)-(14,17,1,31)

FS05	(21,14,2,4)-(13,17,1,17)-(18,11,1,35)
FS06	(8,2,1,2)-(13,8,2,23)-(19,2,2,40)
FS07	(5,3,1,4)-(7,11,2,20)-(16,17,1,40)
FS08	(18,6,1,3)-(22,1,1,17)-(30,7,1,39)
FS09	(20,16,2,1)-(17,22,1,17)-(20,30,2,41)
FS10	(5,15,1,3)-(5,18,2,8)-(14,21,1,35)
FS11	(17,11,1,3)-(21,17,2,24)-(23,12,2,35)-(22,5,1,43)
FS12	(30,31,1,4)-(30,25,1,14)-(23,21,1,30)-(18,17,1,47)
FS13	(8,7,1,1)-(15,10,1,20)-(14,18,2,31)-(20,20,2,45)
FS14	(7,21,2,1)-(15,19,2,20)-(13,24,1,34)-(8,17,2,48)
FS15	(16,3,2,1)-(10,3,2,13)-(17,9,1,26)-(12,6,2,45)
FS16	(25,19,2,1)-(15,20,2,20)-(11,16,1,30)-(18,19,1,43)
FS17	(6,10,2,2)-(3,1,1,15)-(7,7,1,28)-(0,2,2,45)
FS18	(16,15,1,1)-(19,16,1,12)-(15,21,2,28)-(9,22,2,43)
FS19	(21,29,1,1)-(23,22,2,14)-(18,18,2,29)-(23,13,2,45)
FS20	(26,30,1,1)-(22,26,1,11)-(17,25,1,23)-(13,20,1,37)
FS21	(21,19,2,1)-(22,14,1,14)-(16,19,2,27)-(10,23,2,42)
FS22	(14,29,2,1)-(9,24,2,16)-(16,20,1,30)-(11,16,1,43)
FS23	(6,30,1,2)-(13,29,2,16)-(7,25,1,29)-(4,21,1,43)
FS24	(23,5,2,1)-(23,2,2,10)-(18,8,2,25)-(22,14,2,40)

FS25	(3,3,2,2)-(11,6,1,15)-(13,0,2,29)-(10,4,2,43)
FS26	(30,5,1,1)-(27,5,1,10)-(23,6,1,22)-(20,7,2,35)-(21,11,1,46)
FS27	(15,0,1,3)-(13,2,2,13)-(12,5,1,24)-(15,7,2,35)-(14,11,1,45)
FS28	(9,12,1,3)-(11,14,2,14)-(14,15,1,25)-(13,18,2,36)-(18,17,2,49)
FS29	(26,6,2,4)-(25,8,2,14)-(24,11,2,26)-(22,13,1,37)-(21,9,1,48)
FS30	(24,9,2,1)-(20,8,2,10)-(23,10,1,20)-(21,9,2,34)-(25,6,1,49)
FS31	(0,30,2,1)-(9,25,2,15)-(16,30,1,30)-(22,24,2,44)
FS32	(12,23,2,4)-(3,19,1,19)-(11,17,1,33)-(17,26,2,49)
FS33	(12,5,1,1)-(4,9,1,15)-(8,13,1,38)-(13,17,1,48)
FS34	(25,2,1,2)-(19,5,1,15)-(15,8,2,27)-(20,18,1,45)
FS35	(10,30,1,1)-(13,25,1,11)-(18,21,1,23)-(13,20,2,35)
FS36	(31,25,1,1)-(26,23,2,10)-(21,25,1,21)-(18,22,2,32)-(12,19,2,42)
FS37	(23,18,1,1)-(28,13,1,13)-(23,9,2,27)-(28,16,2,42)-(26,18,2,49)
FS38	(14,28,1,3)-(19,23,1,15)-(14,18,2,28)-(21,16,2,42)-(25,17,1,49)
FS39	(22,10,2,3)-(18,15,2,16)-(14,10,1,29)-(16,14,2,39)-(12,12,1,49)
FS40	(3,2,1,1)-(6,8,2,12)-(12,4,2,25)-(16,8,1,36)-(20,12,1,46)
FS41	(13,23,2,3)-(18,20,2,13)-(19,25,1,26)-(18,23,1,34)-(21,31,1,49)
FS42	(2,18,2,1)-(8,15,1,13)-(12,20,2,26)-(17,17,1,36)-(16,22,1,47)
FS43	(28,21,2,1)-(23,18,1,11)-(20,20,2,21)-(15,17,2,33)-(18,27,2,49)
FS44	(28,9,2,2)-(22,5,1,14)-(19,10,1,25)-(15,14,2,37)-(20,12,2,48)

FS45	(12,13,2,1)-(18,17,1,10)-(22,20,2,21)-(20,14,1,33)-(14,19,1,47)
FS46	(15,19,2,1)-(10,22,2,12)-(7,19,2,24)-(13,16,2,40)-(11,11,1,49)
FS47	(5,14,1,3)-(1,14,2,12)-(6,17,2,25)-(8,13,1,33)-(7,19,1,47)
FS48	(7,22,1,1)-(8,27,1,11)-(14,27,2,22)-(5,23,1,42)-(6,25,1,49)
FS49	(20,0,2,4)-(17,4,1,14)-(14,2,1,24)-(19,7,2,38)-(21,13,1,49)
FS50	(28,5,2,3)-(23,9,1,15)-(19,11,1,25)-(28,13,1,39)-(26,16,2,49)

ตารางที่ 20: ตารางเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ

รหัสแผนที่	ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหา (วินาที)	
	หน่วยประมวลผลกลาง	หน่วยประมวลผลภาพ
BS01	1170.14	393.75
BS02	1490.91	511.69
BS03	1102.78	366.58
BS04	1071.88	352.13
BS05	1165.56	408.38
BS06	1076.72	350.94
BS07	1038.28	338.8
BS08	1169.33	373.25
BS09	1167.69	392.72
BS10	1321.3	431.73

BS11	1458.86	486.17
BS12	1397.53	464.45
BS13	1298.49	434.58
BS14	1544.8	497.8
BS15	1362.73	454.22
BS16	1267.91	412.88
BS17	1394.47	446.47
BS18	1460.72	479.64
BS19	1417.41	474.92
BS20	1175.16	386.14
BS21	1333.52	444.66
BS22	1427.34	463.45
BS23	1366.89	454.59
BS24	1327.11	443.75
BS25	1450.72	473.95
BS26	1264.05	423.83
BS27	1462.33	486.17
BS28	1560.89	511.14
BS29	1455.88	467.36
BS30	1587.91	514.89

BS31	1358.45	457.97
BS32	1582.72	515.3
BS33	1269.91	426.77
BS34	1584.74	512.3
BS35	1207.02	406.11
BS36	1586.34	524.58
BS37	1411.67	477.44
BS38	1578.17	524.58
BS39	1585.64	519.42
BS40	1548.02	514.83
BS41	1546.92	500.88
BS42	1524.75	509.95
BS43	1553.41	507.02
BS44	1293.02	436.19
BS45	1585.77	530.67
BS46	1589.25	519.98
BS47	1482.67	494.75
BS48	1579.89	511.7
BS49	1577.8	530.94
BS50	1555.56	519.63

ตารางที่ 21: ตารางเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ

รหัสแผนที่	ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหา (วินาที)	
	หน่วยประมวลผลกลาง	หน่วยประมวลผลภาพ
FS01	357.03	283.36
FS02	331.59	264.58
FS03	389.61	312.38
FS04	326.75	269.84
FS05	365.81	285.05
FS06	420.94	339.34
FS07	416.48	324.08
FS08	418.95	321.11
FS09	435.22	354.25
FS10	361.02	289.11
FS11	448.69	357.73
FS12	478.06	380.27
FS13	469.56	384.48
FS14	509.36	411.64
FS15	484.59	387.42
FS16	455.19	370
FS17	477.69	381.67
FS18	447.05	366.48

FS19	473.84	381.25
FS20	384.92	320.31
FS21	452.52	362.02
FS22	456.81	366.03
FS23	449.05	359.91
FS24	432.88	347.45
FS25	455.86	364.19
FS26	478.17	389.66
FS27	465.03	368.94
FS28	510.31	406.45
FS29	506.94	394.95
FS30	522.59	417.45
FS31	457.09	375.58
FS32	511.92	401.66
FS33	492.64	412.11
FS34	460.91	377.52
FS35	359.81	302.52
FS36	431.16	358.27
FS37	504.06	415.25
FS38	501.44	404.64

FS39	513.59	411.83
FS40	477.3	394.17
FS41	515.08	507.55
FS42	493.06	406.69
FS43	515.3	423.5
FS44	502.64	408.24
FS45	493.97	407.08
FS46	519.03	423.97
FS47	489.53	390.64
FS48	505.55	416.33
FS49	503.66	403.75
FS50	510.13	412.39

ตารางที่ 22: ตารางเปรียบเทียบร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟ

รหัสแผนที่	ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง	
	หน่วยประมวลผลกลาง	หน่วยประมวลผลภาพ
BS01	60.97	35.90
BS02	40.21	49.74
BS03	51.85	50.00
BS04	58.73	46.56

BS05	37.57	33.33
BS06	40.74	33.33
BS07	46.03	47.62
BS08	44.97	33.33
BS09	38.89	38.36
BS10	33.33	33.33
BS11	29.76	25.00
BS12	30.56	25.00
BS13	53.57	34.13
BS14	27.78	25.00
BS15	20.24	25.00
BS16	58.33	46.43
BS17	35.32	38.89
BS18	17.46	25.00
BS19	39.29	39.29
BS20	25.00	25.00
BS21	11.11	25.00
BS22	13.10	27.78
BS23	30.56	25.00
BS24	25.00	25.00

BS25	33.73	30.95
BS26	42.54	35.56
BS27	32.38	23.81
BS28	26.03	30.16
BS29	42.86	32.06
BS30	45.40	33.33
BS31	30.56	25.00
BS32	29.76	27.38
BS33	27.38	34.13
BS34	27.38	27.38
BS35	44.05	40.48
BS36	35.56	35.56
BS37	41.59	39.05
BS38	24.76	22.86
BS39	36.83	39.37
BS40	24.76	24.13
BS41	22.86	20.00
BS42	22.86	20.00
BS43	15.24	31.11
BS44	37.78	40.00

BS45	36.51	22.22
BS46	25.71	40.63
BS47	43.49	35.56
BS48	38.89	25.71
BS49	30.48	35.56
BS50	28.57	20.00

ตารางที่ 23: ตารางเปรียบเทียบร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำ

รหัสแผนที่	ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง	
	หน่วยประมวลผลกลาง	หน่วยประมวลผลภาพ
FS01	33.33	33.33
FS02	33.33	33.33
FS03	61.90	58.73
FS04	33.33	33.33
FS05	44.44	44.44
FS06	33.33	33.33
FS07	33.33	33.33
FS08	33.33	33.33
FS09	37.04	33.33
FS10	42.86	46.03

FS11	28.57	29.76
FS12	25.00	25.00
FS13	25.00	25.00
FS14	43.25	42.06
FS15	57.14	58.73
FS16	25.00	30.56
FS17	47.22	47.22
FS18	44.05	42.46
FS19	25.00	25.00
FS20	25.00	25.00
FS21	53.17	55.56
FS22	27.38	26.19
FS23	36.11	33.33
FS24	54.76	54.76
FS25	29.76	29.76
FS26	33.33	33.33
FS27	35.56	35.56
FS28	34.60	37.46
FS29	52.06	55.24
FS30	85.08	85.08

FS31	25.00	25.00
FS32	33.33	36.11
FS33	25.00	25.00
FS34	25.00	25.00
FS35	25.00	25.00
FS36	20.95	20.95
FS37	39.05	39.05
FS38	20.00	20.00
FS39	23.81	24.76
FS40	20.00	20.00
FS41	44.13	41.90
FS42	20.00	20.00
FS43	20.00	22.22
FS44	20.00	20.00
FS45	22.22	20.00
FS46	38.10	41.90
FS47	68.25	68.10
FS48	51.11	48.89
FS49	29.52	29.52
FS50	20.00	20.00

ตารางที่ 24: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์ของการลามของไฟที่ใช้ในการทดสอบการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

รหัสแผนที่	จุดควบคุม (x, y, radius, time)
B01	(29,16,1,1)-(31,9,1,29)-(28,8,2,35)-(21,8,2,43)-(20,4,1,49)
B02	(28,23,1,1)-(23,9,2,37)
B03	(5,20,1,1)-(8,22,1,16)-(14,26,2,41)
B04	(19,8,2,1)-(24,7,1,9)-(24,0,2,30)
B05	(18,29,2,1)-(11,12,2,28)-(6,12,1,35)-(5,6,1,43)-(1,6,2,48)
B06	(23,0,1,1)-(17,30,1,40)
B07	(31,7,1,1)-(31,26,2,35)-(28,29,1,43)-(23,29,1,48)
B08	(14,29,2,1)-(17,27,1,8)-(31,30,1,40)
B09	(21,8,2,1)-(8,27,1,43)-(8,31,2,49)
B10	(18,13,1,1)-(18,17,2,6)-(16,25,2,21)-(10,24,1,28)
B11	(20,21,1,1)-(25,22,1,8)
B12	(7,28,2,1)-(4,2,2,37)
B13	(25,23,2,1)-(27,20,2,21)-(25,15,1,31)-(25,10,2,37)-(27,7,1,46)
B14	(3,21,1,1)-(13,9,2,42)
B15	(7,14,2,1)-(8,18,1,26)-(5,23,1,34)-(8,26,1,49)
B16	(28,25,2,1)-(24,11,2,36)
B17	(0,15,2,1)-(5,12,2,10)-(14,16,2,41)
B18	(18,16,1,1)-(4,21,2,28)-(1,26,2,36)-(0,30,2,41)

B19	(3,15,1,1)-(5,13,2,9)-(21,21,1,39)
B20	(27,6,2,1)-(30,17,1,17)
B21	(6,16,2,1)-(7,21,1,7)-(7,30,2,36)
B22	(14,6,1,1)-(14,13,1,8)-(20,16,1,19)
B23	(13,27,1,1)-(10,25,2,11)
B24	(29,17,1,1)-(6,16,1,32)
B25	(3,15,1,1)-(3,10,1,9)-(3,4,1,16)-(5,0,2,23)-(13,2,1,38)
B26	(28,29,1,1)-(30,25,2,16)-(31,18,1,24)-(28,16,2,33)
B27	(30,30,1,1)-(27,24,1,12)
B28	(24,30,2,1)-(26,27,1,11)-(26,22,1,26)
B29	(22,10,1,1)-(18,12,2,12)-(10,10,2,42)-(11,6,1,47)
B30	(2,26,2,1)-(2,20,1,16)
B31	(20,21,2,1)-(13,28,2,31)
B32	(16,21,1,1)-(15,25,1,10)-(15,30,2,16)-(8,30,1,32)
B33	(30,29,1,1)-(31,23,2,16)
B34	(12,20,2,1)-(2,13,2,27)-(2,6,2,35)-(8,6,2,44)-(8,1,2,49)
B35	(25,14,2,1)-(16,17,1,28)-(14,22,2,44)-(12,25,1,49)
B36	(4,18,1,1)-(0,19,2,10)-(2,29,2,29)
B37	(28,19,1,1)-(31,17,2,10)-(29,8,1,28)
B38	(10,31,1,1)-(11,24,1,9)-(18,9,2,37)

B39	(18,15,1,1)-(20,18,2,7)
B40	(13,3,2,1)-(10,1,2,6)
B41	(26,9,2,1)-(19,9,1,9)
B42	(28,19,2,1)-(17,24,1,26)-(9,25,2,36)
B43	(24,30,2,1)-(17,28,1,13)-(2,21,2,44)
B44	(5,7,2,1)-(16,23,2,35)
B45	(30,3,2,1)-(16,10,2,35)-(11,8,2,43)-(11,3,2,48)
B46	(28,3,2,1)-(25,27,2,41)
B47	(1,9,2,1)-(11,22,1,25)
B48	(28,4,2,1)-(27,25,1,26)-(27,29,2,34)-(22,29,1,39)
B49	(10,3,2,1)-(6,0,1,26)-(1,1,1,33)
B50	(4,18,1,1)-(5,5,2,17)

ตารางที่ 25: รายการจุดควบคุมของแผนที่เหตุการณ์ของการไหลของน้ำที่ใช้ในการทดสอบการคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

รหัสแผนที่	จุดควบคุม (x, y, radius, time)
F01	(7,2,2,1)-(14,3,1,10)-(31,11,2,42)-(30,15,2,47)
F02	(20,24,1,1)-(11,8,1,34)
F03	(15,27,1,1)-(27,18,2,23)
F04	(20,19,1,1)-(29,11,2,22)-(31,2,2,34)-(25,0,2,43)
F05	(22,20,1,1)-(13,4,2,38)

F06	(15,27,1,1)-(24,11,2,36)
F07	(21,19,1,1)-(19,28,1,13)-(1,31,1,37)
F08	(22,13,1,1)-(19,16,2,8)-(11,29,1,33)-(1,27,2,45)
F09	(27,18,2,1)-(17,23,1,19)-(7,17,2,37)
F10	(31,26,2,1)-(26,10,2,26)-(21,5,1,37)-(16,5,1,42)-(11,5,1,47)
F11	(13,4,2,1)-(19,4,1,8)-(21,14,2,21)-(13,22,2,39)-(4,23,1,49)
F12	(7,7,2,1)-(8,31,1,46)
F13	(27,14,2,1)-(20,11,2,12)-(13,22,2,31)-(12,30,1,40)
F14	(7,23,2,1)-(24,23,1,18)-(29,20,1,27)-(28,6,1,44)
F15	(20,20,1,1)-(15,3,1,27)-(9,1,2,36)
F16	(0,13,2,1)-(0,20,2,8)
F17	(11,17,1,1)-(11,10,1,9)
F18	(16,30,1,1)-(16,8,2,28)-(26,8,2,39)-(26,17,1,49)
F19	(16,8,2,1)-(12,15,1,12)-(3,20,2,27)-(3,27,1,35)-(10,29,1,45)
F20	(16,2,2,1)-(30,1,1,17)
F21	(4,31,1,1)-(26,28,2,31)
F22	(15,8,1,1)-(15,13,1,6)-(4,17,1,21)-(5,26,2,32)
F23	(27,8,2,1)-(17,2,2,18)
F24	(18,9,2,1)-(18,20,2,13)-(18,31,1,25)-(30,31,2,37)
F25	(15,10,1,1)-(26,0,2,26)-(30,2,2,32)

F26	(9,18,1,1)-(9,23,2,7)-(27,26,1,33)
F27	(9,14,2,1)-(19,5,2,20)
F28	(20,19,1,1)-(5,29,1,34)
F29	(18,7,2,1)-(22,28,1,49)
F30	(11,9,2,1)-(9,16,2,11)-(6,29,1,28)-(1,29,2,34)-(1,22,1,42)
F31	(13,3,2,1)-(30,3,1,18)
F32	(16,2,1,1)-(26,17,2,31)-(26,24,1,39)-(24,31,2,48)
F33	(8,15,1,1)-(16,7,2,21)-(18,3,2,28)
F34	(1,16,1,1)-(0,11,1,8)
F35	(15,22,1,1)-(15,17,1,7)-(15,10,2,15)-(26,4,2,36)
F36	(5,4,1,1)-(0,4,1,6)
F37	(8,31,1,1)-(1,21,2,20)
F38	(27,29,1,1)-(13,18,2,31)
F39	(18,29,2,1)-(5,25,1,20)-(1,22,1,28)-(6,15,2,40)-(7,10,2,46)
F40	(11,18,2,1)-(11,13,1,7)-(2,3,1,27)
F41	(12,18,2,1)-(11,12,2,8)-(3,11,2,18)
F42	(12,29,1,1)-(12,4,1,40)-(10,1,1,46)
F43	(27,10,2,1)-(27,27,1,21)
F44	(3,23,1,1)-(0,12,1,15)-(8,5,1,33)
F45	(26,30,2,1)-(17,24,1,19)

F46	(7,18,1,1)-(8,28,1,12)-(19,30,1,25)
F47	(2,16,1,1)-(24,13,2,44)-(29,13,2,49)
F48	(5,0,2,1)-(10,20,1,40)-(14,22,1,46)
F49	(7,17,2,1)-(2,7,1,20)-(0,1,2,29)
F50	(13,21,1,1)-(16,24,1,8)-(31,31,1,30)

ตารางที่ 26: ผลการทดลองสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อทำการปรับแก้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยเดิม

รหัสแผนที่	ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริง		ร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทาง	
	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยเดิม	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยเดิม	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้
B01	24.71	28.47	21.18	1.04
B02	44.71	70.63	34.36	3.09
B03	24.69	47.44	51.69	3.86
B04	31.46	67.52	37.88	4.04
B05	17.04	61.75	3.45	3.26
B06	44.44	50.00	1.54	0.00
B07	23.61	64.32	5.38	2.51
B08	34.39	66.14	34.63	3.90
B09	26.98	75.31	10.85	7.67

B10	29.10	75.93	11.23	3.16
B11	83.33	98.15	20.51	12.82
B12	42.86	77.78	7.01	2.97
B13	15.87	27.83	14.14	9.09
B14	47.35	60.85	29.13	4.21
B15	19.05	29.89	62.25	12.25
B16	54.76	64.29	50.50	6.93
B17	44.81	58.20	31.67	3.33
B18	26.47	86.51	7.71	4.48
B19	29.45	66.84	18.35	5.99
B20	65.34	89.95	15.48	9.52
B21	43.92	61.82	40.96	7.23
B22	41.98	79.01	14.20	2.47
B23	47.62	78.31	78.10	11.43
B24	50.00	72.22	1.67	4.58
B25	26.67	75.67	3.88	3.10
B26	25.46	66.80	15.74	6.02
B27	90.74	100.00	3.03	6.06
B28	29.01	64.81	63.57	8.53
B29	38.49	44.44	64.49	5.07

B30	58.20	73.54	30.56	14.81
B31	44.44	57.94	61.90	8.10
B32	39.35	76.85	22.38	3.33
B33	47.72	66.95	19.54	12.64
B34	24.23	48.94	22.74	5.78
B35	25.13	40.21	35.42	10.42
B36	28.64	81.24	19.11	1.78
B37	32.76	72.17	62.35	2.47
B38	40.12	75.31	2.12	0.79
B39	66.93	79.89	13.33	11.43
B40	51.98	61.38	45.05	25.23
B41	57.14	76.19	23.08	19.66
B42	37.04	79.19	22.32	6.42
B43	46.91	79.19	11.27	2.94
B44	40.48	75.40	14.47	5.17
B45	38.96	51.79	28.60	2.80
B46	42.06	83.33	13.38	4.99
B47	45.37	90.74	15.58	6.49
B48	23.81	69.05	6.34	5.51
B49	20.63	41.62	108.16	5.44

B50	51.59	79.89	9.05	3.70

ตารางที่ 27: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

รหัสแผนที่	ไม่ใช้	เพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง					60 รุ่นไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	60 รุ่นไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
		20 รุ่น	40 รุ่น	60 รุ่น	80 รุ่น	100 รุ่น		
B01	28.47	52.01	62.17	46.93	46.03	66.98	56.46	49.58
B02	70.63	66.67	69.58	76.19	70.63	78.57	77.78	73.02
B03	47.44	42.50	37.57	69.14	69.14	50.26	68.25	53.44
B04	67.52	93.16	88.89	81.52	81.62	84.41	88.89	82.91
B05	61.75	79.31	89.79	91.22	91.90	91.32	90.58	88.73
B06	50.00	57.41	50.00	50.00	49.07	53.70	50.00	51.85
B07	64.32	68.09	77.92	79.59	62.82	88.68	80.41	88.18
B08	66.14	82.28	84.04	84.57	88.36	84.74	84.04	79.10
B09	75.31	91.45	92.02	71.92	78.69	73.48	78.16	77.63
B10	75.93	80.56	80.95	82.54	82.54	74.74	82.14	83.73
B11	98.15	55.56	79.63	90.74	87.04	88.89	79.63	100.00
B12	77.78	75.40	91.27	91.27	84.13	89.68	89.68	88.89
B13	27.83	40.11	59.47	33.23	44.76	52.91	49.95	47.09

B14	60.85	66.40	78.57	69.05	68.78	69.05	73.81	71.16
B15	29.89	27.38	48.15	32.94	22.75	17.46	53.97	41.93
B16	64.29	69.84	73.81	80.95	65.08	61.90	74.60	73.02
B17	58.20	65.08	69.31	52.91	71.10	69.31	52.38	53.64
B18	86.51	89.75	90.19	92.90	91.70	89.75	91.77	90.88
B19	66.84	75.84	90.48	87.65	68.25	84.66	86.60	79.37
B20	89.95	89.42	78.84	93.65	66.93	88.10	98.15	100.00
B21	61.82	56.79	72.22	80.86	74.69	78.40	79.63	80.95
B22	79.01	82.72	80.25	82.72	82.72	90.12	82.72	83.95
B23	78.31	90.48	72.75	73.28	88.89	42.86	87.30	77.25
B24	72.22	61.11	61.11	72.22	64.81	68.52	74.07	75.93
B25	75.67	81.60	94.47	95.73	92.25	90.54	96.98	94.02
B26	66.80	77.91	81.35	79.03	65.48	53.04	81.35	78.77
B27	100.00	79.63	98.15	100.00	100.0	98.15	100.0	100.00
B28	64.81	67.28	42.59	62.35	62.35	54.32	79.63	75.31
B29	44.44	57.54	40.21	71.56	60.71	44.05	64.81	56.22
B30	73.54	46.83	61.11	44.71	96.56	39.95	90.48	95.77
B31	57.94	69.84	57.14	64.29	65.87	57.14	72.22	75.40
B32	76.85	86.11	67.13	85.19	78.24	71.30	82.41	81.02
B33	66.95	50.00	83.33	68.09	79.49	84.05	71.37	86.61

B34	48.94	67.83	75.34	67.88	76.30	72.59	72.12	70.74
B35	40.21	48.28	68.65	55.03	67.99	69.58	63.49	78.04
B36	81.24	75.46	65.19	71.63	87.41	84.79	85.50	84.11
B37	72.17	82.72	85.28	66.19	88.22	90.31	84.90	85.76
B38	75.31	68.43	60.32	53.4	39.68	81.48	59.44	52.73
B39	79.89	85.19	62.96	73.54	70.90	51.32	82.54	90.21
B40	61.38	65.87	36.64	53.04	59.92	57.54	55.29	69.05
B41	76.19	95.77	81.22	96.30	92.59	83.60	93.65	94.44
B42	79.19	64.90	86.77	90.30	88.01	92.59	94.36	87.48
B43	79.19	84.57	84.13	86.68	87.83	86.07	84.04	87.30
B44	75.40	85.71	85.71	79.37	77.78	80.95	52.54	80.95
B45	51.79	73.35	80.49	82.01	78.04	77.18	80.42	80.89
B46	83.33	84.13	87.30	84.92	87.30	88.89	89.68	88.10
B47	90.74	94.44	92.59	90.74	89.81	95.37	70.74	90.74
B48	69.05	73.81	88.73	89.02	69.58	77.65	86.90	82.14
B49	41.62	45.24	38.45	42.86	55.56	19.58	66.31	82.36
B50	79.89	91.01	96.83	96.83	96.03	96.03	94.44	93.39

ตารางที่ 28: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่จริงสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น

รหัสแผนที่	120 รุ่น	140 รุ่น	160 รุ่น	180 รุ่น	200 รุ่น
B01	43.17	43.17	43.17	43.17	43.17
B02	66.67	66.67	66.67	66.67	66.67
B03	62.96	62.96	62.96	62.96	62.96
B04	66.67	66.67	66.67	66.67	66.67
B05	76.35	76.35	76.35	76.35	76.35
B06	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
B07	60.04	60.04	60.04	60.04	60.04
B08	72.22	72.22	72.22	72.22	72.22
B09	74.64	74.64	74.64	74.64	74.64
B10	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00
B11	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
B12	73.81	73.81	73.81	73.81	73.81
B13	45.08	45.08	45.08	45.08	45.08
B14	59.52	59.52	59.52	59.52	59.52
B15	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44
B16	71.43	71.43	71.43	71.43	71.43
B17	49.21	49.21	49.21	49.21	49.21

B18	91.07	91.07	91.07	91.07	91.07
B19	60.32	60.32	60.32	60.32	60.32
B20	88.89	88.89	88.89	88.89	88.89
B21	62.96	62.96	62.96	62.96	62.96
B22	70.37	70.37	70.37	70.37	70.37
B23	90.48	90.48	90.48	90.48	90.48
B24	66.67	66.67	66.67	66.67	66.67
B25	71.62	71.62	71.62	71.62	71.62
B26	72.22	72.22	72.22	72.22	72.22
B27	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
B28	88.89	88.89	88.89	88.89	88.89
B29	42.86	42.86	42.86	42.86	42.86
B30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
B31	57.14	57.14	57.14	57.14	57.14
B32	66.67	66.67	66.67	66.67	66.67
B33	92.31	92.31	92.31	92.31	92.31
B34	48.57	48.57	48.57	48.57	48.57
B35	65.08	66.27	66.27	66.27	66.27
B36	84.74	84.74	84.74	84.74	84.74
B37	72.36	72.36	72.36	72.36	72.36

B38	58.73	58.73	58.73	58.73	58.73
B39	92.86	92.86	92.86	92.86	92.86
B40	86.11	86.11	86.11	86.11	86.11
B41	97.62	97.62	97.62	97.62	97.62
B42	80.42	80.42	80.42	80.42	80.42
B43	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84
B44	78.57	78.57	78.57	78.57	78.57
B45	58.33	58.33	58.33	58.33	58.33
B46	78.57	78.57	78.57	78.57	78.57
B47	88.89	88.89	88.89	88.89	88.89
B48	68.25	68.25	68.25	68.25	68.25
B49	77.78	77.78	77.78	77.78	77.78
B50	78.57	78.57	78.57	78.57	78.57

ตารางที่ 29: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดจริงสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

รหัสแผนที่	ไม่ใช้	เพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง					100 รุ่นไปลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	100 รุ่นไปคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
		20 รุ่น	40 รุ่น	60 รุ่น	80 รุ่น	100 รุ่น		
F01	95.76	91.7	96.58	99.54	97.97	99.54	93.73	98.15
F02	90.74	98.15	100.00	100.00	100.00	96.3	92.59	94.44
F03	86.51	77.78	92.86	83.33	96.83	99.21	96.83	98.41
F04	95.12	93.59	97.44	99.36	98.08	95.51	96.64	93.83
F05	98.41	97.62	97.62	100.00	100.00	100.00	96.03	97.62
F06	95.24	98.41	99.21	99.21	99.21	97.62	94.44	100.00
F07	83.95	83.33	90.74	81.48	77.78	85.19	83.33	85.8
F08	87.5	88.43	92.13	91.67	87.04	93.06	88.43	79.63
F09	90.48	86.24	95.24	97.35	94.18	98.94	91.36	96.12
F10	68.25	69.31	89.63	84.97	94.92	91.22	59.37	8063
F11	71.01	71.22	84.55	88.47	78.94	86.88	69.95	74.71
F12	97.22	86.11	100.00	100.00	97.22	100.00	94.44	100.00
F13	82.67	83.6	97.75	97.22	98.68	99.6	75.93	94.97
F14	34.26	47.22	53.7	63.89	61.11	66.67	43.52	47.22
F15	88.27	90.12	86.42	93.21	95.06	96.3	93.21	93.21
F16	100.00	97.44	100.00	100.00	100.00	100.00	98.72	97.44

F17	100.00	94.44	100.00	100.00	96.3	100.00	98.15	100.00
F18	57.41	55.29	75.13	73.46	71.96	78.17	65.21	80.56
F19	77.57	70.58	87.94	93.12	93.23	94.5	72.49	75.87
F20	79.63	100.00	98.15	100.00	98.15	100.00	92.59	96.3
F21	90.48	80.16	76.19	86.51	80.95	85.71	84.13	89.68
F22	69.84	72.22	80.56	80.82	80.56	83.73	70.63	83.33
F23	96.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F24	58.33	59.45	75.63	82.31	79.76	86.33	67.98	78.72
F25	98.15	97.53	98.77	100.00	100.00	100.00	98.77	99.38
F26	80.95	83.42	96.3	93.83	95.06	95.06	94	98.24
F27	95.24	97.62	95.24	97.62	96.83	95.24	97.62	96.03
F28	94.44	94344	100.00	100.00	100.00	98.15	98.15	94.44
F29	98.15	96.3	100.00	100.00	100.00	100.00	94.44	94.44
F30	85.56	83.7	93.7	91.11	92.96	96.3	87.46	92.65
F31	55.56	70.37	68.52	72.22	74.07	72.22	61.11	70.37
F32	65.33	67.86	80.9	94.47	84.65	88.15	79.4	80.99
F33	96.83	97.35	97.88	98.41	95.77	98.41	97.88	96.83
F34	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F35	78.17	84.13	87.3	97.2	90.08	94.44	89.11	86.11
F36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

F37	94.44	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F38	93.65	88.1	93.65	92.86	96.83	94.4	96.83	92.86
F39	89.42	83.6	94.6	91.64	91.75	92.06	81.9	93.65
F40	95.06	98.77	95.06	91.36	95.06	80.25	87.65	97.53
F41	96.30	98.94	98.41	100.00	99.47	98.94	99.47	98.94
F42	86.42	67.9	88.89	85.19	91.36	86.42	87.65	93.83
F43	88.89	83.33	92.59	75.93	98.15	92.59	83.33	88.89
F44	95.06	91.36	93.83	87.65	88.89	83.83	91.36	98.77
F45	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F46	79.01	72.84	71.6	69.14	70.37	71.6	80.25	77.78
F47	85.71	91.01	94.18	94.71	97.35	96.3	87.3	89.95
F48	85.19	93.83	95.06	88.89	98.77	97.53	92.59	91.36
F49	98.77	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F50	88.89	69.44	77.78	83.33	100.00	77.78	94.44	94.44

ตารางที่ 30: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่จริงสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น

รหัสแผนที่	120 รุ่น	140 รุ่น	160 รุ่น	180 รุ่น	200 รุ่น
F01	95.83	95.83	95.83	95.83	95.83
F02	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

F03	95.24	95.24	95.24	95.24	95.24
F04	94.96	94.96	96.89	96.89	98.81
F05	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F06	95.24	97.62	97.62	97.62	97.62
F07	62.96	68.52	79.63	90.74	90.74
F08	80.56	81.94	86.11	86.11	86.11
F09	96.83	96.83	98.41	98.41	98.41
F10	71.43	73.65	73.65	75.87	75.87
F11	68.57	68.57	68.57	68.57	68.57
F12	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F13	96.03	97.22	94.84	97.22	97.22
F14	25.00	33.33	30.56	36.11	36.11
F15	94.44	96.30	98.15	98.15	98.15
F16	96.15	96.15	96.15	96.15	96.15
F17	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F18	46.43	46.43	46.43	46.43	47.62
F19	76.19	77.14	77.14	77.14	77.14
F20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F21	95.24	95.24	95.24	95.24	95.24
F22	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00

F23	95.24	95.24	95.24	95.24	95.24
F24	73.27	73.27	77.81	77.81	75.43
F25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F27	88.10	88.10	88.10	88.10	88.10
F28	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F29	94.44	94.44	94.44	94.44	94.44
F30	98.89	98.89	98.89	98.89	98.89
F31	72.22	72.22	72.22	72.22	72.22
F32	85.23	87.15	89.07	89.07	89.07
F33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F34	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F35	82.14	82.14	82.14	82.14	82.14
F36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F37	88.89	88.89	88.89	88.89	91.67
F38	97.62	97.62	97.62	97.62	97.62
F39	86.98	87.94	87.94	89.84	89.84
F40	88.89	88.89	88.89	88.89	88.89
F41	98.41	98.41	98.41	98.41	98.41

F42	81.48	85.19	85.19	85.19	85.19
F43	66.67	66.67	66.67	66.67	66.67
F44	96.30	96.30	96.30	96.30	96.30
F45	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F46	51.85	51.85	59.26	59.26	59.26
F47	87.30	90.48	90.48	90.48	90.48
F48	88.89	88.89	88.89	88.89	88.89
F49	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
F50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ตารางที่ 31: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

รหัสแผนที่	ไม่ใช้	เพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง					60 รุ่นไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	60 รุ่นไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
		20 รุ่น	40 รุ่น	60 รุ่น	80 รุ่น	100 รุ่น		
B01	1.04	1.74	2.08	4.86	2.43	1.04	5.21	1.39
B02	3.09	6.87	4.47	4.12	5.15	5.50	3.78	3.09
B03	3.86	37.20	71.98	4.35	5.31	28.99	4.35	8.70
B04	4.04	5.05	6.06	5.05	5.56	8.08	6.06	5.56
B05	3.26	2.87	4.02	4.98	3.45	4.41	2.68	2.68

B06	0.00	0.62	0.00	0.31	0.31	1.23	0.62	0.31
B07	2.51	0.36	0.36	0.72	0.36	0.00	1.79	1.08
B08	3.90	4.33	5.19	5.63	3.90	3.46	3.90	6.06
B09	7.67	5.82	8.99	8.47	12.17	6.88	5.29	4.76
B10	3.16	1.40	2.11	2.11	1.40	1.40	1.75	2.81
B11	12.82	61.54	34.62	19.23	28.21	19.23	32.05	24.36
B12	2.97	3.82	4.25	4.67	4.03	3.61	3.82	6.16
B13	9.09	13.47	4.04	11.11	9.76	6.73	5.39	5.72
B14	4.21	5.83	2.91	2.91	3.88	4.21	2.91	3.24
B15	12.25	25.98	32.84	25.49	90.20	51.47	6.37	2.94
B16	6.93	6.27	6.93	9.90	9.57	13.20	7.29	6.93
B17	3.33	1.67	2.00	2.00	3.33	1.33	3.33	1.33
B18	4.48	3.98	3.23	3.73	3.98	4.23	2.24	3.23
B19	5.99	7.87	3.37	5.24	5.24	4.12	3.75	5.99
B20	9.52	19.64	19.05	18.45	32.14	19.64	14.88	16.07
B21	7.23	4.42	5.62	8.03	5.22	6.02	5.22	4.42
B22	2.47	8.02	7.41	6.17	8.02	11.73	6.79	3.70
B23	11.43	4.76	56.19	15.24	4.76	66.67	8.57	6.67
B24	4.58	1.25	0.42	2.92	2.50	4.17	0.83	1.67
B25	3.10	3.49	3.10	4.65	5.81	2.71	5.04	4.26

B26	6.02	6.02	5.56	3.70	6.48	14.81	6.02	4.63
B27	6.06	11.11	14.14	11.11	10.10	9.09	6.06	12.12
B28	8.53	5.43	68.22	44.19	14.73	24.81	3.88	4.65
B29	5.07	1.81	9.42	4.71	3.26	2.54	3.99	2.17
B30	14.81	25.93	36.11	40.74	15.74	36.11	9.26	12.04
B31	8.10	4.76	23.33	8.57	12.38	13.33	6.19	7.62
B32	3.33	2.86	13.81	0.95	5.24	1.90	0.48	1.43
B33	12.64	28.74	8.05	24.14	8.05	6.90	14.94	4.60
B34	5.78	4.62	3.66	9.63	4.43	5.01	5.01	3.66
B35	10.42	7.64	5.21	17.01	9.38	4.86	5.21	4.86
B36	1.78	2.67	15.56	3.56	1.78	1.78	3.11	2.22
B37	2.47	4.94	6.17	9.26	4.32	4.32	4.94	3.09
B38	0.79	1.85	1.06	0.79	0.26	1.59	0.79	1.32
B39	11.43	15.24	22.86	14.29	32.38	40.95	6.67	9.52
B40	25.23	28.83	41.44	18.02	24.32	33.33	20.72	5.41
B41	19.66	24.79	17.09	16.24	21.37	27.35	16.24	17.09
B42	6.42	15.29	7.65	7.34	7.34	7.95	6.42	7.09
B43	2.94	4.90	5.15	4.41	5.15	5.88	4.41	4.17
B44	5.17	6.20	7.24	4.91	5.94	6.20	5.43	4.91
B45	2.80	3.66	3.87	5.16	2.80	3.44	4.52	4.09

B46	4.99	4.99	5.44	5.44	6.80	7.71	3.35	5.67
B47	6.49	6.93	13.85	15.15	19.05	12.99	13.85	12.55
B48	5.51	4.41	6.06	4.68	6.89	3.31	5.23	4.68
B49	5.44	37.41	30.61	67.35	27.89	74.15	4.03	4.76
B50	3.70	5.35	4.94	2.06	2.06	7.00	2.88	8.23

ตารางที่ 32: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น

รหัสแผนที่	120 รุ่น	140 รุ่น	160 รุ่น	180 รุ่น	200 รุ่น
B01	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
B02	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22
B03	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
B04	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03
B05	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87
B06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B07	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23
B08	5.19	5.19	5.19	5.19	5.19
B09	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76
B10	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11
B11	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69

B12	4.46	4.46	4.46	4.46	4.46
B13	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04
B14	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91
B15	14.71	14.71	14.71	14.71	14.71
B16	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93
B17	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
B18	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48
B19	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62
B20	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50
B21	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82
B22	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
B23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B24	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
B25	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
B26	5.56	5.56	5.56	5.56	5.56
B27	9.09	9.09	9.09	9.09	9.09
B28	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
B29	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
B30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B31	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14

B32	2.86	1.43	1.43	1.43	1.43
B33	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45
B34	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89
B35	10.42	10.42	10.42	10.42	10.42
B36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B37	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
B38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38
B39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B40	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
B41	17.95	17.95	17.95	17.95	17.95
B42	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
B43	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94
B44	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
B45	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23
B46	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08
B47	10.39	10.39	10.39	10.39	10.39
B48	8.26	8.26	8.26	8.26	8.26
B49	8.16	8.16	8.16	8.16	8.16
B50	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70

ตารางที่ 33: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด

รหัสแผนที่	ไม่ใช้	เพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง					100 รุ่นไปลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	100 รุ่นไปคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
		20 รุ่น	40 รุ่น	60 รุ่น	80 รุ่น	100 รุ่น		
F01	20.59	11.89	11.89	11.04	12.74	12.53	17.2	9.55
F02	7.92	1.25	1.25	1.25	4.17	1.25	5	3.75
F03	1.37	0.34	0	1.03	0.34	0	0.34	0.34
F04	5.81	9.6	4.8	6.31	4.55	5.81	7.07	6.82
F05	7.12	4.27	4.84	3.7	6.55	3.13	9.12	5.13
F06	9.52	4.48	5.88	4.76	5.6	4.76	7.28	6.16
F07	9.42	6.52	2.9	4.71	2.54	2.17	8.7	11.59
F08	23.08	11.42	7.69	11.19	11.19	13.75	17.02	16.55
F09	17.87	8.00	11.2	7.73	10.13	9.33	12.27	13.07
F10	20.39	9.87	14.91	12.5	9.21	11.62	12.28	12.28
F11	35.8	17.8	20.45	29.17	22.73	27.08	31.25	25.38
F12	10.23	3.03	3.79	4.92	3.41	3.79	7.58	7.2
F13	15.15	13.85	9.74	13.2	10.61	12.99	13.64	13.85
F14	29.57	17.54	23.56	33.33	25.31	15.29	25.06	28.32
F15	16.04	4.09	5.66	8.18	4.4	3.46	17.3	5.35
F16	0	0	0	0	0	0	0	0

F17	0	0	0	0	0	0	0	0
F18	40.87	25.46	30.99	25.46	19.93	22.78	38.02	26.97
F19	34.85	18.83	18.4	19.7	16.02	18.18	24.24	28.14
F20	0	0	0	0	0	0	0	0
F21	10.92	2.52	0.84	1.4	1.96	1.96	1.4	1.68
F22	13.51	8.05	5.75	12.07	7.18	11.49	12.93	12.64
F23	0.39	0	0	0	0	0	0.39	0
F24	15.59	8.39	8.87	11.75	8.87	8.39	12.71	11.99
F25	2.49	1.56	1.25	0.62	1.25	1.25	4.67	0.31
F26	8.59	1.72	2.75	2.41	2.75	3.09	7.22	3.78
F27	0.69	0.34	0	1.37	0	0.34	0.69	0
F28	2.95	2.53	1.67	1.69	1.69	1.27	7.59	4.22
F29	10.00	7.04	4.07	5.93	4.44	2.96	10.37	9.63
F30	11.42	10.7	6.39	10.27	8.45	9.13	10.96	10.73
F31	0	0.97	0.97	0.97	0.48	0.97	0	0
F32	25.88	17.06	18.82	25.29	26.67	13.92	27.25	22.94
F33	4.21	2.81	0.7	1.05	1.4	2.11	5.26	1.05
F34	0	0	0	0	0	0	0	0
F35	23.46	8.4	14.32	18.52	9.14	16.54	28.89	17.78
F36	0	0	0	0	0	0	0	0

F37	0.44	0	0	0	0	0	0	0
F38	7.51	3.9	2.1	2.1	2.1	1.2	4.5	1.8
F39	19.34	17.49	20.99	17.49	14.61	13.79	21.4	13.79
F40	5.49	1.57	1.57	2.35	1.57	1.18	4.31	4.31
F41	1.05	0	0.35	0.7	1.05	0.35	0	0
F42	15.99	15.31	14.97	7.14	17.01	5.78	22.45	14.63
F43	1.45	0.48	0	0	0	0.48	0.48	0
F44	9.3	5.43	1.94	2.33	5.04	3.49	8.14	6.2
F45	0	0	0	0	0	0	0	0
F46	5.06	2.53	0.42	0.42	0	0.84	8.02	4.64
F47	11.89	9.55	10.4	13.16	14.86	9.34	14.23	13.59
F48	9.82	3.51	3.16	3.16	3.86	5.96	10.18	4.56
F49	2.47	0	0.41	0	0.41	0.41	2.06	1.65
F50	7.32	0.41	0.41	0.81	0.41	0	3.66	2.44

ตารางที่ 34: ค่าร้อยละของเหตุการณ์ที่เกิดนอกเส้นทางสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น

รหัสแผนที่	120 รุ่น	140 รุ่น	160 รุ่น	180 รุ่น	200 รุ่น
F01	23.57	20.38	21.66	21.02	21.02
F02	3.75	2.50	2.50	2.50	5.00

F03	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06
F04	3.03	3.03	3.03	1.52	1.52
F05	10.26	12.82	12.82	9.40	9.40
F06	8.40	7.56	7.56	7.56	7.56
F07	14.13	14.13	14.13	17.39	17.39
F08	11.89	11.89	11.89	12.59	11.89
F09	8.00	7.20	8.00	8.00	6.40
F10	19.08	15.13	14.47	13.16	10.53
F11	25.00	22.73	19.32	19.32	19.32
F12	12.50	12.50	11.36	11.36	10.23
F13	16.88	15.58	12.99	12.99	12.99
F14	20.30	27.82	24.06	22.56	15.04
F15	10.38	11.32	8.49	7.55	9.43
F16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F18	16.08	16.08	15.58	23.12	24.62
F19	24.68	22.73	23.38	20.13	18.83
F20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F21	11.76	11.76	10.92	10.92	10.92
F22	8.62	8.62	7.76	7.76	9.48

F23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F24	33.81	25.18	28.06	25.90	25.90
F25	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
F26	8.25	8.25	7.22	7.22	7.22
F27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F28	6.33	6.33	3.80	2.53	2.53
F29	16.67	13.33	14.44	15.56	14.44
F30	14.38	13.01	12.33	11.64	10.96
F31	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
F32	18.82	23.53	22.35	20.00	20.00
F33	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16
F34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F35	14.07	15.56	15.56	21.48	21.48
F36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F38	11.71	9.91	9.01	9.91	9.01
F39	26.54	22.84	21.60	22.84	22.84
F40	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
F41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

F42	25.51	24.49	23.47	23.47	21.43
F43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F44	8.14	6.98	6.98	8.14	9.30
F45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F46	2.53	7.59	5.06	1.27	5.06
F47	11.47	17.20	16.56	16.56	15.29
F48	10.53	10.53	9.47	10.53	10.53
F49	4.94	4.94	2.47	2.47	2.47
F50	9.76	9.76	9.76	8.54	8.54

ตารางที่ 35: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด (วินาที)

รหัสแผนที่	ไม่ใช้	เพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง					60 รุ่นไบลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	60 รุ่นไบคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
		20 รุ่น	40 รุ่น	60 รุ่น	80 รุ่น	100 รุ่น		
B01	453.04	465.85	495.48	386.94	439.33	663.28	514.91	519.00
B02	352.19	309.12	370.90	436.89	374.18	512.98	439.21	439.71
B03	388.70	186.16	180.03	448.77	509.56	419.53	475.51	381.18
B04	294.41	302.38	321.71	316.90	385.91	380.05	359.50	358.94
B05	449.73	465.80	490.01	540.25	594.75	658.09	545.74	550.89

B06	372.09	383.01	408.49	461.64	488.55	537.41	462.35	465.43
B07	446.87	446.60	490.08	533.66	580.95	635.45	553.42	543.84
B08	380.87	387.90	415.44	456.41	497.46	537.21	464.42	462.87
B09	459.09	471.61	502.90	414.97	388.62	487.05	524.65	522.31
B10	276.59	274.09	301.70	332.99	363.58	359.20	342.23	339.64
B11	19.07	10.43	27.06	40.07	29.07	76.14	38.69	42.22
B12	354.85	314.93	389.48	439.52	369.94	513.37	432.64	438.38
B13	431.86	236.06	470.21	214.00	378.63	515.65	434.42	414.49
B14	400.51	408.13	433.75	490.80	515.96	570.17	482.85	488.03
B15	449.93	209.71	360.49	219.36	101.65	148.91	486.75	478.89
B16	344.79	271.24	377.47	419.13	290.76	264.94	417.86	424.64
B17	388.33	400.09	426.34	401.57	511.54	557.04	411.04	409.77
B18	387.09	389.82	425.81	469.59	507.96	559.17	484.32	479.24
B19	367.66	287.25	407.03	449.36	361.53	536.09	458.11	369.31
B20	57.36	44.45	39.71	53.98	32.37	47.11	55.60	52.16
B21	344.60	355.39	377.28	415.31	452.04	502.62	424.18	423.33
B22	200.94	135.93	90.04	204.05	192.28	162.38	211.73	205.45
B23	92.82	129.40	76.11	115.25	184.38	12.51	146.81	115.67
B24	311.75	315.59	337.82	338.58	403.79	444.24	374.47	379.07
B25	362.63	371.34	393.24	433.49	480.67	527.22	440.58	443.70

B26	317.32	318.28	349.10	385.90	305.16	220.01	398.18	393.06
B27	34.29	22.82	30.25	31.63	31.31	34.78	36.17	33.96
B28	223.50	196.81	116.53	193.02	239.68	204.09	271.87	270.77
B29	439.73	443.59	369.15	529.20	571.98	630.14	545.59	540.23
B30	122.56	29.18	73.32	49.89	227.32	44.47	191.92	195.56
B31	303.26	312.93	236.46	378.86	319.69	312.40	370.35	374.83
B32	311.84	309.84	241.47	350.29	326.22	330.89	361.67	357.73
B33	78.06	21.91	187.00	164.07	142.77	253.05	162.76	213.81
B34	458.25	472.13	499.99	414.72	602.08	639.82	522.94	527.26
B35	455.58	334.49	500.71	391.97	466.77	532.77	529.59	525.14
B36	284.34	284.72	225.18	250.91	375.95	411.23	323.21	323.25
B37	217.36	246.75	299.68	207.25	360.76	396.57	288.32	288.10
B38	354.05	355.06	383.66	424.27	460.47	513.51	437.08	436.40
B39	16.76	49.34	28.25	50.28	64.78	8.38	72.26	74.99
B40	12.36	34.69	4.77	7.85	26.64	30.80	29.27	32.89
B41	20.78	23.95	18.91	23.69	20.76	19.14	22.64	25.91
B42	344.15	250.57	317.96	411.87	449.11	494.42	423.38	422.73
B43	414.29	414.17	451.73	503.29	539.84	588.86	517.78	514.55
B44	339.59	347.39	370.35	405.06	443.53	489.39	396.77	400.22
B45	448.98	457.09	490.53	538.28	579.52	648.10	554.89	551.49

B46	389.67	398.96	426.74	482.35	516.92	562.32	474.53	477.11
B47	159.79	109.03	104.02	118.18	146.92	182.40	114.98	120.67
B48	372.07	382.51	408.13	448.17	491.37	543.90	460.47	458.03
B49	317.80	143.71	164.95	195.11	271.85	83.14	385.31	381.53
B50	148.97	144.76	199.80	221.37	244.76	200.82	193.86	163.29

ตารางที่ 36: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การลามของไฟเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น

รหัสแผนที่	120 รุ่น	140 รุ่น	160 รุ่น	180 รุ่น	200 รุ่น
B01	496.68	578.41	660.48	742.36	824.29
B02	389.89	453.87	518.20	580.89	643.62
B03	424.75	494.74	564.84	635.24	705.45
B04	318.55	371.36	424.00	476.54	528.53
B05	489.79	570.56	651.79	733.19	814.43
B06	410.68	478.18	546.30	613.92	681.55
B07	479.33	558.58	638.59	718.90	798.12
B08	404.90	471.72	538.45	605.33	672.08
B09	492.04	573.32	654.44	736.65	819.62
B10	290.36	338.41	386.41	434.37	482.39
B11	14.05	14.05	14.05	14.05	14.05

B12	385.79	449.34	513.07	576.57	640.46
B13	471.22	549.01	626.94	705.35	783.47
B14	434.06	506.18	578.07	650.08	722.22
B15	493.50	576.17	658.85	741.29	823.94
B16	377.83	440.03	500.90	561.60	622.39
B17	425.11	495.33	565.52	635.87	705.95
B18	426.38	496.78	566.97	637.05	706.90
B19	406.81	473.75	540.80	608.16	675.14
B20	57.70	57.70	57.70	57.70	57.70
B21	376.29	438.42	500.70	562.77	624.98
B22	211.15	246.24	281.20	316.33	351.24
B23	131.07	153.24	175.55	197.91	220.27
B24	338.40	393.44	447.78	502.14	556.42
B25	392.80	457.28	522.18	585.38	648.51
B26	346.04	403.30	460.79	518.34	575.89
B27	29.03	29.03	29.03	29.03	29.03
B28	277.96	323.89	369.69	415.71	461.97
B29	480.44	559.67	638.84	717.70	796.90
B30	180.82	211.01	241.09	271.01	301.16
B31	327.71	382.35	436.58	490.69	545.04

B32	330.07	384.06	438.09	492.08	546.11
B33	181.63	211.77	241.67	271.49	301.30
B34	488.32	569.10	649.81	730.50	811.20
B35	490.13	571.04	652.02	733.85	817.17
B36	308.81	358.55	408.05	457.52	507.09
B37	289.06	336.73	384.41	432.13	479.73
B38	376.90	439.12	501.39	565.16	628.92
B39	95.64	111.57	127.66	143.43	159.31
B40	86.75	100.95	115.26	129.51	143.78
B41	19.14	19.14	19.14	19.14	19.14
B42	376.83	438.96	501.08	563.48	625.74
B43	454.59	529.68	605.01	680.02	754.70
B44	367.29	427.86	488.68	548.74	609.00
B45	493.46	575.11	656.28	737.95	819.64
B46	424.07	493.90	564.20	634.25	704.03
B47	116.08	116.08	116.08	116.08	116.08
B48	402.02	468.39	534.67	601.07	667.69
B49	345.06	401.00	456.93	512.79	568.64
B50	193.76	225.90	258.00	290.02	321.86

ตารางที่ 37: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียด (วินาที)

รหัสแผนที่	ไม่ใช้	เพิ่มระดับความละเอียดโดยตรง					100 รุ่นไปลีเนียร์อินเตอร์โพเลชัน	100 รุ่นไปคิวบิกอินเตอร์โพเลชัน
		20 รุ่น	40 รุ่น	60 รุ่น	80 รุ่น	100 รุ่น		
F01	228.14	200.95	227.51	259.19	277.80	282.62	275.29	277.29
F02	164.34	156.95	180.87	201.97	214.94	227.19	219.75	223.42
F03	111.32	121.81	136.05	155.81	168.95	178.73	172.41	175.86
F04	207.91	188.16	213.93	241.21	259.07	266.92	257.50	259.69
F05	184.37	168.77	187.52	216.71	240.24	243.02	234.99	240.17
F06	173.84	163.23	182.66	206.69	226.62	235.51	227.16	232.08
F07	177.08	170.42	194.63	216.98	234.16	236.81	232.50	233.93
F08	216.22	194.64	221.77	250.65	269.17	276.59	265.91	268.29
F09	178.91	170.39	191.52	217.48	235.91	235.49	232.35	233.04
F10	226.89	203.84	227.86	254.63	273.03	285.36	274.90	277.13
F11	241.80	210.12	235.17	262.45	281.41	289.56	282.99	285.69
F12	219.10	194.88	219.85	246.60	266.21	277.29	267.89	273.45
F13	196.73	177.52	203.52	229.50	246.92	253.73	244.33	246.59
F14	211.86	192.57	212.64	246.62	264.16	272.28	260.77	262.68
F15	174.62	166.30	188.34	213.65	229.97	232.25	227.49	229.54
F16	41.02	75.38	83.29	95.64	105.81	113.33	110.64	112.72

F17	45.50	77.21	88.47	100.85	112.89	119.61	116.66	118.80
F18	238.73	211.70	230.17	266.21	285.29	293.66	281.52	284.13
F19	219.70	197.08	222.02	246.68	262.30	272.25	266.29	268.29
F20	83.48	102.09	115.90	130.92	143.68	152.88	148.03	150.47
F21	148.73	147.80	161.96	188.61	202.41	212.94	205.58	208.14
F22	153.49	153.97	167.84	195.93	211.14	216.74	209.69	210.64
F23	88.51	106.10	116.69	135.62	146.05	153.52	150.38	152.13
F24	178.88	171.24	187.96	214.14	233.00	238.84	232.03	233.87
F25	154.62	152.20	170.57	195.17	211.89	215.06	209.90	211.08
F26	158.07	158.22	176.02	198.93	218.72	222.18	216.20	218.32
F27	98.23	113.84	126.14	144.51	155.74	162.21	159.68	161.49
F28	162.49	158.60	178.15	200.86	214.82	221.73	219.57	221.50
F29	234.35	206.85	233.64	262.29	278.95	288.86	282.92	284.76
F30	207.79	188.67	210.58	233.38	248.32	258.18	252.69	253.83
F31	87.52	105.75	119.96	136.29	147.64	153.37	150.40	151.38
F32	232.54	206.99	226.65	258.24	280.42	285.74	278.57	280.08
F33	134.61	139.96	156.61	177.60	195.13	200.31	194.22	196.13
F34	41.03	73.19	84.68	97.71	107.50	112.07	110.87	110.71
F35	173.57	168.35	185.97	208.54	227.20	232.99	227.96	229.12
F36	31.71	67.70	77.36	90.55	99.63	104.21	102.83	103.44

F37	97.34	114.19	127.38	146.04	158.81	163.26	160.63	161.32
F38	149.76	150.27	166.61	189.55	206.90	210.83	206.75	207.86
F39	222.30	200.18	224.49	250.03	262.25	275.53	270.32	272.30
F40	130.13	142.89	153.70	174.07	192.57	197.42	192.39	193.85
F41	89.79	106.65	119.56	135.72	150.08	153.83	151.11	152.40
F42	218.06	197.90	224.16	249.36	270.39	277.58	268.73	272.99
F43	101.77	117.11	132.07	150.63	166.18	169.66	165.26	166.26
F44	157.18	155.66	176.88	198.33	216.31	222.86	217.02	218.91
F45	92.33	110.51	125.18	141.85	155.76	160.67	157.85	158.09
F46	119.79	128.28	146.23	164.32	178.75	184.81	181.76	183.50
F47	236.85	206.43	233.64	258.37	280.21	290.97	283.73	284.99
F48	218.50	196.47	223.43	247.40	266.73	276.72	268.60	272.66
F49	139.59	141.74	160.55	178.37	195.74	202.88	198.51	200.80
F50	143.65	145.22	163.92	183.97	201.26	206.06	201.55	203.62

ตารางที่ 38: ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาสำหรับเหตุการณ์การไหลของน้ำเมื่อไม่ใช้การคำนวณแบบหลายระดับความละเอียดที่จำนวนรุ่นมากกว่า 100 รุ่น

รหัสแผนที่	120 รุ่น	140 รุ่น	160 รุ่น	180 รุ่น	200 รุ่น
F01	213.79	249.19	284.60	320.09	355.80
F02	172.35	201.27	229.79	258.21	286.75

F03	129.14	150.57	172.06	193.50	215.03
F04	200.11	233.21	266.25	299.26	332.21
F05	182.81	212.87	242.95	273.36	304.18
F06	178.01	207.26	236.40	265.45	294.62
F07	178.15	207.49	237.00	266.60	296.10
F08	206.49	240.73	274.87	309.03	343.05
F09	177.55	206.95	236.34	265.67	295.01
F10	212.83	248.10	283.47	318.82	354.16
F11	222.41	258.97	295.79	332.60	369.31
F12	210.34	245.11	279.89	314.77	349.67
F13	188.64	219.81	250.95	282.33	313.49
F14	203.10	236.79	270.54	304.07	337.56
F15	174.05	202.91	231.72	260.57	289.57
F16	73.86	86.16	98.42	110.71	123.27
F17	80.03	92.98	105.88	118.82	131.79
F18	220.61	257.19	293.58	330.45	367.06
F19	207.43	241.71	276.00	310.19	344.64
F20	106.64	124.85	142.81	160.73	178.77
F21	157.28	183.29	209.80	236.01	262.02
F22	159.78	186.06	212.51	239.02	265.59

F23	110.23	128.52	146.69	165.05	183.35
F24	178.55	208.05	237.60	267.07	296.78
F25	158.93	185.30	211.52	237.72	263.96
F26	163.19	190.55	217.80	244.74	271.92
F27	117.36	136.69	156.11	175.48	194.92
F28	167.46	194.97	222.85	250.70	278.58
F29	221.47	258.11	294.61	331.26	367.77
F30	196.20	228.66	261.16	293.68	326.34
F31	110.14	128.44	146.58	164.85	182.94
F32	217.85	253.92	290.21	326.20	362.54
F33	145.41	169.48	193.73	217.73	241.96
F34	73.38	85.61	97.62	109.80	121.91
F35	174.36	203.22	232.01	260.85	289.58
F36	67.75	78.95	90.18	101.41	112.66
F37	116.22	135.48	154.65	173.87	193.15
F38	155.22	180.90	206.54	232.38	258.08
F39	210.21	245.24	279.99	314.68	349.42
F40	142.76	166.31	189.91	213.40	236.89
F41	110.19	128.58	146.88	165.11	183.34

F42	209.81	244.60	279.23	313.94	348.60
F43	121.03	141.13	161.15	181.16	201.20
F44	163.62	190.70	217.76	244.82	271.87
F45	113.30	132.03	150.67	169.35	188.07
F46	135.03	157.26	179.62	202.01	224.33
F47	220.82	257.12	293.54	330.02	366.46
F48	209.28	244.09	279.22	313.72	348.47
F49	149.28	174.19	198.95	223.61	248.24
F50	153.42	178.75	204.28	229.70	255.08

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชาตา ซาลวาลา เกิดเมื่อ พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา จากนั้นจึงเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2545 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ในสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ในปีการศึกษา 2548 หลังจากทำงานแล้วได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552

ผลงานการตีพิมพ์ Chata Salwala, Vishnu Kotrajaras and Paramate Horkaew, Improving Performance for Emergent Environments Parameter Tuning and Simulation in Games Using GPU, Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on, Chengdu, China, pp. 37 - 41