รายงานสำหรับผู้บริหาร

(Executive Report)

โครงการศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดิน บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

(Analysis of Land Subsidence in Bangkok Metropolitan and its Vicinity Area)

เสนอ
กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โดย
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิงหาคม 2552

สัญญาเลขที่ 67/2551

รายงานสำหรับผู้บริหาร
โครงการ “ศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล”

คณะกรรมการตรวจสอบงาน

1. ดร. อรนุช หล่อเพ็ญศรี	ประธานกรรมการตรวจสอบงาน
2. นายฤทธิไกร ภาวภูตานนท์ ณ มหาสารคาม	กรรมการตรวจสอบงาน
3. นายสุรัฐ ศิลากุล	กรรมการตรวจสอบงาน
4. นายบรรจง พรมจันทร์	กรรมการตรวจสอบงาน
5. นางสาวอุไร บางยี่ขัน	กรรมการตรวจสอบงาน

รายงานสำหรับผู้บริหาร

โครงการ “ศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล”

	คณะที่ปรึกษา	สังกัด
1.	รศ.ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (หัวหน้าโครงการ)
2.	รศ.ดร. สุจริต คูณธนกุลวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (หัวหน้าโครงการร่วม)
3.	รศ.ดร.วันชัย เทพรักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4.	รศ.ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5.	Dr. David Zeitoun	ผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศ อิสราเอล
6.	Dr. Eliyahu Wakshal	ผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศ อิสราเอล
7.	รศ.ดร.นพดล เพียรเวช	School of Engineering and Technology, AIT
8.	รศ.ดร.สุวัฒนา ธาดานิติ	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9.	รศ.ดร. ฐิรวัตร บุญญะฐี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10.	ผศ.ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11.	ผศ.ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12.	ผศ.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13.	อ.ดร.พัชรศักดิ์ อาลัย	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
14.	นายเจริญ เชื่อมไธสง	ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยา
15.	นายเจตน์ จุลวงศ์	ที่ปรึกษาด้านอุทกธรณีวิทยา
16.	นายโชคชัย สุทธิธรรมจิต	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
17.	นายธนกร ชมภูรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
18.	นายนัฐวุฒิ เหมะธุลิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
19.	นายมนตรี มีสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
20.	นายนวพงษ์ นาคบรรพ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
21.	นายสุเชาว์ ทุมมากรน์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22.	นางสาวทิพย์รัตน์ สุภา	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
23.	นายภานุวัฒน์ อังคสุรักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
24.	นายอรุณ บุรีรักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
25.	นายสุวิชช์ รอดภัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
26.	นายวีรพล เพชรานนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
27.	นางสาววรรณฐินี แก้วไทรย้อย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

คำนำ

โครงการศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยหน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนับสนุนโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อรวบรวมสภาพแผ่นดินทรุดจากอดีตถึงปัจจุบันในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล วิเคราะห์หาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน จากการลดลงของระดับแรงดันน้ำในดินเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล การรับน้ำหนักของดินจากการเติบโตของเมือง และการอัดตัวตามธรรมชาติของชั้นดินร่วนที่รองรับพื้นที่บริเวณดังกล่าว และจัดทำข้อเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวของแผ่นดินต่อไป

ทางคณะที่ปรึกษาหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานสำหรับผู้บริหารเล่มนี้ จะมีเนื้อหาที่เป็นประโยชน์ต่อกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในการวางแผนบริหารจัดการและเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวของแผ่นดินต่อไป

คณะที่ปรึกษา

สิงหาคม 2552

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานของโครงการศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยอาศัยข้อมูลต่างๆ จากบุคลากรในหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ได้แก่ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กรมแผนที่ทหาร สำนักโยธาธิการและผังเมือง กรมทรัพยากรน้ำ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กรมชลประทาน การประปานครหลวง การประปาส่วนภูมิภาค สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฯลฯ นอกจากนี้ ทางโครงการฯ ยังได้รับความอนุเคราะห์ในการเข้าติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวของแผ่นดินจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศาลากลางจังหวัดสมุทรสาคร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และวัดบางพลีใหญ่กลาง จังหวัดสมุทรปราการ

ทางคณะที่ปรึกษาต้องขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ และบุคคลที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินงานของโครงการ และทางโครงการตั้งใจใช้ข้อมูลจากบุคลากรดังกล่าวข้างต้น ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และนำเสนอสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อท่าน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อกรมทรัพยากรน้ำบาดาล รวมถึงหน่วยงาน และบุคคลากรที่เกี่ยวข้องต่อไป

บทคัดย่อ

การทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลเป็นเหตุการณ์ที่เกิดมาต่อเนื่องและยาวนาน จากข้อมูลการติดตามระดับการทรุดตัวของแผ่นดินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลและกรมแผนที่ทหารดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 พบว่า ข้อมูลการทรุดตัวสะสมของแผ่นดิน บริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ระหว่างปี พ.ศ. 2521-2550 เกิดพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมขนาด 108 เซนติเมตร บริเวณ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เขตบางกะปิ เนื่องจากในพื้นที่นี้มีการสูบน้ำบาดาลในปริมาณมากซึ่งมีการเติบโตและขยายความเป็นเมืองอย่างรวดเร็ว โดยมีการสร้างตึกสูงและระบบโครงสร้างพื้นฐานเป็นจำนวนมาก เช่น ถนน สะพาน เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการทรุดตัวของแผ่นดิน

วัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อรวบรวมสภาพแผ่นดินทรุดจากอดีตถึงปัจจุบันในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล วิเคราะห์หาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดิน จากการลดลงของระดับแรงดันน้ำในดินเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล การรับน้ำหนักของดินจากการเติบโตของเมือง และการอัดตัวตามธรรมชาติของชั้นดินร่วนที่รองรับพื้นที่บริเวณพื้นที่ศึกษา และจัดทำข้อเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวของแผ่นดินต่อไป การดำเนินการของโครงการประกอบด้วยการทบทวนข้อมูล การวิเคราะห์สภาพวิกฤตแผ่นดินทรุดที่สถานี ศึกษาสภาพการใช้ที่ดิน สภาพน้ำบาดาล การพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัว จัดทำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในโครงการ และจัดทำข้อเสนอแนะต่อมาตรการ

ผลการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลแผ่นดินทรุดจากข้อมูลสถานีสังเกตการณ์พบว่า การทรุดตัวของผิวดินส่วนใหญ่ในปัจจุบัน (พ.ศ. 2550) มีค่าประมาณ 0–2 เซนติเมตรต่อปี โดยพื้นที่ที่ยังคงมีการทรุดตัวด้วยอัตราที่มากกว่า 2 เซนติเมตรต่อปีอยู่บริเวณสถานีตรวจวัดที่ 22 (มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (บางมด)) สถานีตรวจวัดที่ 32 (อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร) สถานีตรวจวัดที่ 35 (ศาลากลางจังหวัดปทุมธานี) นอกจากนี้ยังพบว่ามีแผ่นดินมีการคืนตัวหรือมีระดับที่สูงขึ้นเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 เซนติเมตรต่อปี) ในบางพื้นที่เช่น สถานีตรวจวัดที่ 1 (อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 16 (เขตบางเขน กรุงเทพฯ) สถานีตรวจวัดที่ 17 (อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 18 (เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ) สถานีตรวจวัดที่ 33 (อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 34 (อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 41 (อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี) เนื่องจากระดับแรงดันน้ำมีระดับที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาการยุบอัดตัวในระดับความลึกต่างๆ พบว่า เริ่มมีการคืนตัวในชั้นดินระดับลึกตั้งแต่ 20 เมตรลงไปด้วยอัตราการคืนตัวปานกลาง (1-2

เซนติเมตรต่อปี) อย่างไรก็ตามการยุบอัดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งอยู่ในระดับตื้นก็มีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ผลจากการคืนตัวของชั้นดินในระดับลึกต่อระดับพื้นดินไม่เด่นชัด

ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองการทรุดตัวที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ปรับเทียบจากค่าเฉลี่ยตามพื้นที่สามารถจำแนกหาสาเหตุของการทรุดตัวของแผ่นดินที่ผ่านมา และพบว่าสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาล น้ำหนักอาคารที่กดทับรวมดินถม และการทรุดตามธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 69:29:2 ตามลำดับ ในอนาคตอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลจะยังคงมีผลต่ออัตราการทรุดตัวในที่นี้จะใช้ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ย่อยโดยมีผลสรุปดังนี้ ถ้าอัตราการสูบน้ำบาดาลจะเพิ่มไปเป็น 1,386,411 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในปี พ.ศ. 2570 การทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.07 เซนติเมตรต่อปี และถ้ามีการควบคุมการสูบที่ 800,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน การทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 0.86 เซนติเมตรต่อปี กรณีมีการเติมน้ำบาดาลการทรุดตัวในพื้นที่เติมน้ำบาดาลเฉลี่ยจะคงตัว ในขณะที่พื้นที่นอกเขตเติมน้ำบาดาลมีค่าเท่ากับ 0.81 เซนติเมตรต่อปี

การศึกษาเสนอให้คงมีการควบคุมการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาเพื่อให้คงระดับน้ำบาดาลในระดับที่เหมาะสม (-20 ถึง -30 เมตรจากผิวดิน) และไม่ส่งผลต่อการทรุดตัวที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 1.0 เซนติเมตรต่อปี) ในอนาคต ถึงแม้สถานการณ์ในปัจจุบันจะดีขึ้นแล้ว ในระยะยาวควรมีมาตรการด้านผังเมือง และการป้องกันน้ำท่วมมาช่วยเพื่อสามารถบริหารการเจริญเติบโตของเมืองและการลงทุนสร้างสาธารณูปโภคโดยเฉพาะด้านน้ำประปาให้สอดคล้อง และลดภาระด้านการถมที่ในการก่อสร้างลงได้ และควบคุมการสูบน้ำบาดาลโดยรวมให้อยู่ในอัตรา 0.8 ล้านลูกบาศก์ต่อวัน นอกจากนี้ควรนำเทคโนโลยีการสำรวจและการติดตามสภาพน้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดสมัยใหม่เพื่อให้สามารถติดตามและเตรียมมาตรการเฝ้าระวังแผ่นดินทรุดได้อย่างมีประสิทธิผล

สารบัญ

หนังสือนำส่ง

รายนามคณะกรรมการตรวจสอบงาน

รายนามคณะที่ปรึกษา

คำนำ

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

1. **บทนำ**.....1
2. **การศึกษาสภาพการใช้ที่ดิน**.....4
3. **การศึกษาสภาพน้ำบาดาล**.....7
   - 3.1 จำนวนบ่อและสภาพระดับน้ำบาดาล.....7
   - 3.2 การทรุดตัวของแผ่นดิน.....7
4. **การทบทวนข้อมูลและการวิเคราะห์สภาพแผ่นดินทรุด**.....11
   - 4.1 โครงสร้างชั้นดิน.....11
   - 4.2 สภาพการทรุดตัวของแผ่นดิน.....12
   - 4.3 ข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดิน.....14
   - 4.4 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัว.....16
   - 4.5 การวิเคราะห์น้ำหนักกดทับจากอาคาร.....22
5. **การพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัว**.....24
   - 5.1 การศึกษาที่ผ่านมา.....24
   - 5.2 แบบจำลองที่พัฒนา.....25
   - 5.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัว.....26

สารบัญ (ต่อ)

5.4 ผลการวิเคราะห์สาเหตุแผ่นดินทรุด 28

5.5 สรุปผลการศึกษา..... 30

6. **การศึกษาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์** 34

7. **การจัดทำข้อเสนอแนะ** 36

8. **สรุปผลการศึกษา**..... 39

8.1 สรุปผลการศึกษา 39

8.2 ข้อเสนอแนะ 42

เอกสารอ้างอิง

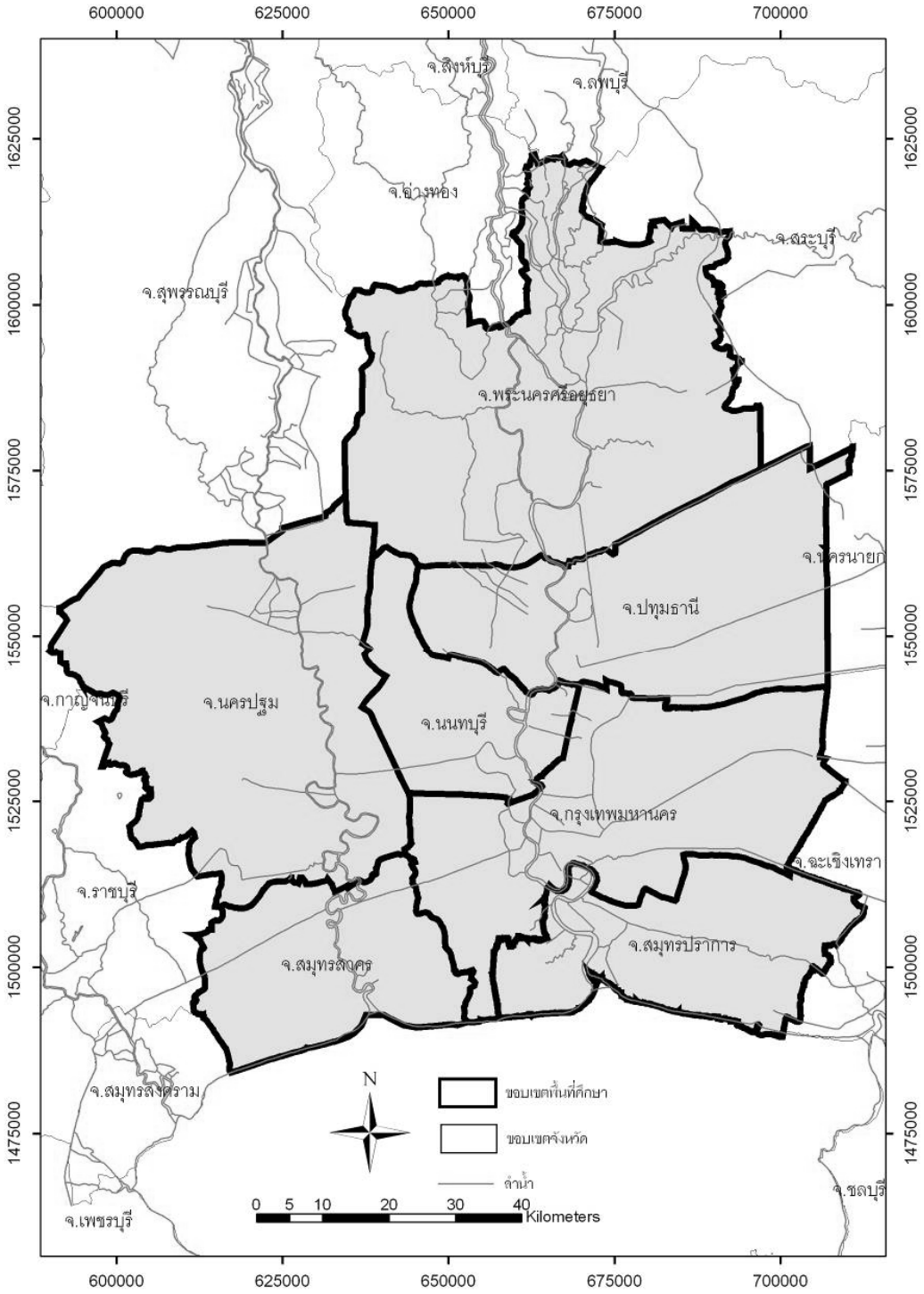
1. บทนำ

การทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลเกิดมาต่อเนื่องและยาวนาน จากข้อมูลการติดตามระดับการทรุดตัวของแผ่นดินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลและกรมแผนที่ทหารดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 ด้วยการเดินสำรวจรังวัดผ่านหมุดหลักฐานสถานีวัดแผ่นดินทรุดของสำนักงานนโยบายและแผน (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติเดิม) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม หมุดหลักฐานทางดิ่ง (ความลึกชั้นทราย) ของกรุงเทพมหานคร หมุดหลักฐานของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (กรมทรัพยากรธรณีเดิม) และหมุดหลักฐานของกรมแผนที่ทหาร โดยเป็นการสำรวจระดับชั้นที่ 1 และมีการออกปฏิบัติทุก ๆ ปี อัตราการทรุดตัวของแต่ละปีจะได้จากการคำนวณค่าระดับของหมุดหลักฐานต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าระดับสูงของปีที่ผ่านมา หากพิจารณาข้อมูลการทรุดตัวสะสมของแผ่นดิน บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระหว่างปี พ.ศ. 2521- 2550 พื้นที่บริเวณ ม.รามคำแหง เขตบางกะปิมีการทรุดตัวสะสมขนาด 108 เซนติเมตร เนื่องจากในพื้นที่นี้มีการสูบใช้น้ำบาดาลเป็นจำนวนมาก และมีการเติบโตและขยายความเป็นเมืองอย่างรวดเร็ว โดยมีการสร้างตึกสูงและระบบโครงสร้างพื้นฐานเป็นจำนวนมาก เช่น ถนน สะพาน เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการทรุดตัวของแผ่นดิน ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลกระทบจากปัจจัยดังกล่าวอย่างชัดเจน จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงสาเหตุของการทรุดตัวของแผ่นดินจากปัจจัยทั้งสอง เพื่อทางกรมทรัพยากรน้ำบาดาลจะสามารถ กำหนดแนวทางและมาตรการเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ในอนาคตให้ดียิ่งขึ้นอย่างเป็นระบบ การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้ดังนี้

1) รวบรวมสภาพแผ่นดินทรุดจากอดีตถึงปัจจุบันในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล
2) วิเคราะห์หาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน จากการลดลงของระดับแรงดันน้ำในดิน เนื่องจากการสูบน้ำบาดาล การรับน้ำหนักของดินจากการเติบโตของเมือง และการอัดตัวตามธรรมชาติของชั้นดินร่วนที่รองรับพื้นที่บริเวณดังกล่าว
3) จัดทำข้อเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวแผ่นดินทรุดต่อไป

<u>ขอบเขตพื้นที่ศึกษา</u>

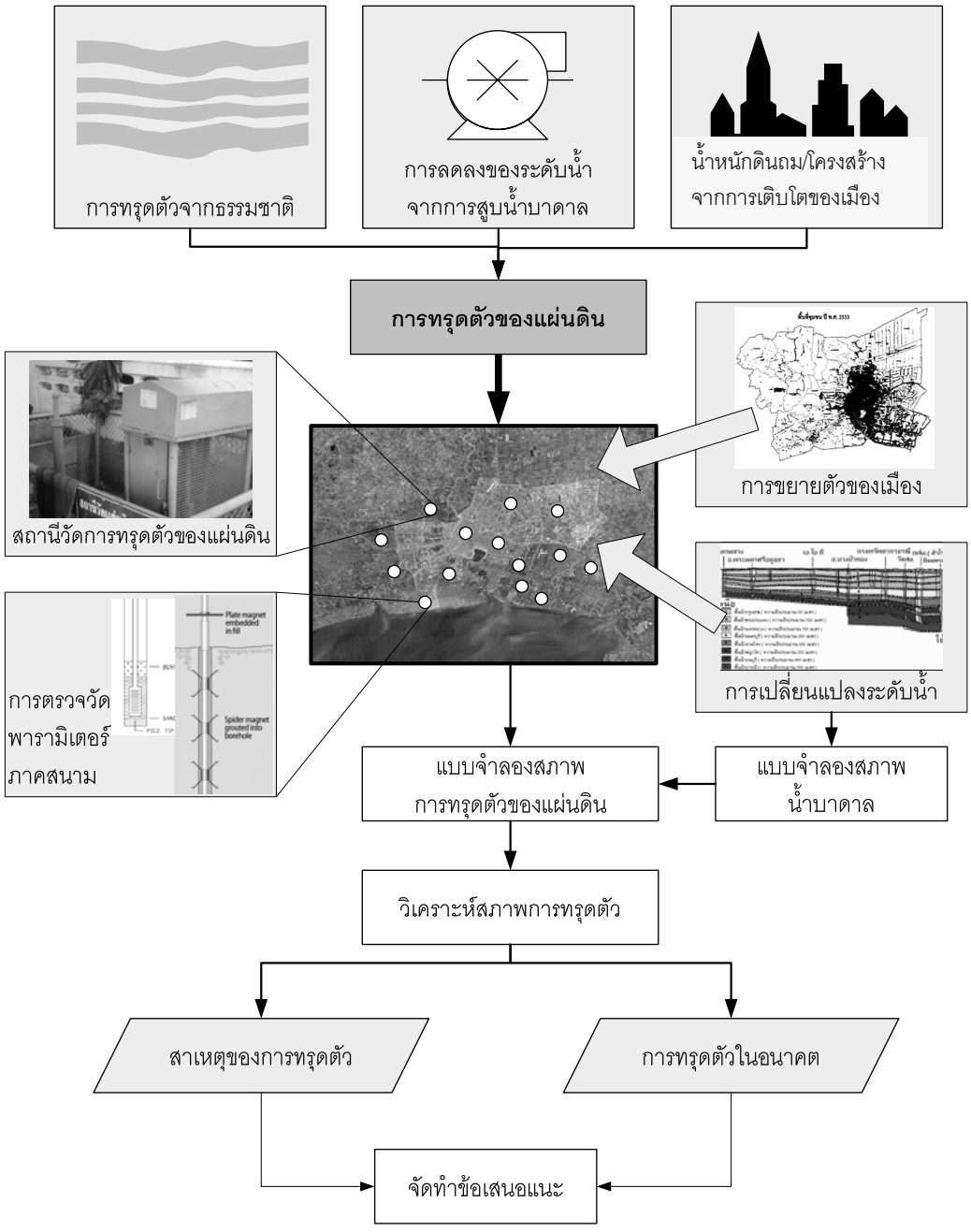
การศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลครอบคลุมชั้นน้ำบาดาลในแอ่งน้ำบาดาลเจ้าพระยาตอนใต้ ซึ่งพื้นที่ศึกษาประกอบด้วยพื้นที่กรุงเทพมหานคร และบริเวณจังหวัดใกล้เคียง ได้แก่ จังหวัดนนทบุรี ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา สมุทรปราการ สมุทรสาคร และนครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1 ที่ตั้งพื้นที่ศึกษา

แนวความคิดการศึกษาของโครงการ

ในการดำเนินงานโครงการศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล มีแนวความคิดการจัดทำโครงการดังรูปที่ 1-2



รูปที่ 1-2 แนวความคิดการศึกษาของโครงการ

2. การศึกษาสภาพการใช้ที่ดิน

การศึกษาสภาพการใช้ที่ดิน เป็นการศึกษาถึงความเป็นเมืองและการเจริญเติบโตของเมือง (Urbanization) ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลอันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักอาคาร (Load of building) องค์ประกอบในการศึกษาความเป็นเมือง แบ่งออกเป็น 4 ประการ ได้แก่ การศึกษาในเรื่องของประชากรเมืองและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ประเภทอาคาร (Building types) และสาธารณูปโภคพื้นฐาน (Infrastructure) ในเรื่องของประเภทอาคาร ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจถึงการใช้อาคาร ความสูงและที่ตั้ง ส่วนโครงสร้างพื้นฐานได้ศึกษาถึงเส้นทางการคมนาคมสายหลักที่เป็นสาเหตุดึงดูดการกระจายตัวของเมืองออกไปในพื้นที่โดยรอบ นอกจากนี้แล้ว การศึกษายังทำทั้งในระดับมหภาค คือ พิจารณาในเขตเทศบาลที่เป็นปริมณฑลของกรุงเทพฯ และเขตกรุงเทพมหานคร และระดับจุลภาค คือ การใช้ที่ดินของพื้นที่โดยรอบหลักหมุดวัดแผ่นดินทรุดใน 4 พื้นที่ตัวอย่าง ได้แก่ 1) พื้นที่โดยรอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง 3) วัดบางพลีใหญ่ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ และ 4) ศาลากลางจังหวัด เทศบาลเมือง จังหวัดสมุทรสาคร ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

1) **ลักษณะการขยายตัวของเมืองที่ผ่านมา** เมื่อพิจารณาสภาพทางกายภาพของเมืองพบว่า มีการกระจายตัวของพื้นที่เมืองไปในพื้นที่ว่างและพื้นที่เกษตรกรรมในเกือบทุกพื้นที่ส่วนขยายของกรุงเทพมหานคร สภาพดังกล่าวอธิบายลักษณะของการกระจายตัวของการใช้พื้นที่ได้ ดังนี้

ลักษณะที่ 1 การขยายตัวออกจากพื้นที่เนื้อเมืองเดิมและการขยายตัวออกเป็นลักษณะแผ่รัศมีต่อเนื่องกับพื้นที่ศูนย์กลางเมืองเกาะกันเป็นกลุ่ม พบได้ในพื้นที่ของจังหวัดนครปฐม จังหวัดปทุมธานี มีลักษณะกระจายตามแนวโครงข่ายถนน และเกาะกลุ่มกัน แต่ยังเชื่อมโยงกับศูนย์กลางเมือง

ลักษณะที่ 2 การขยายตัวออกจากพื้นที่เมืองเดิมแผ่กระจายต่อเนื่องไปในพื้นที่ว่าง อย่างไร้ทิศทาง แต่ยังมีการขยายตัวต่อเนื่องกับพื้นที่ที่เป็นเนื้อเมืองเดิม พบได้อย่างชัดเจนในพื้นที่จังหวัดปทุมธานีที่เป็นเขตติดต่อกับกรุงเทพมหานคร เป็นการขยายตัวออกจากเนื้อเมืองของกรุงเทพมหานคร ในเขตพื้นที่ตำบลคูคต ตำบลลาดสวาย และในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการที่ต่อเนื่องกับกรุงเทพมหานครในพื้นที่ตำบลหนองปรือและตำบลราชาเทวะ

ลักษณะที่ 3 การขยายตัวไม่มีรูปแบบและไร้ทิศทางโดยจะกระจายไปในพื้นที่ว่างและพื้นที่เกษตรกรรมและกระจายตัวไปตามโครงข่ายถนน ลักษณะดังกล่าวพบได้ชัดเจนในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี

ลักษณะที่ 4 การขยายตัวที่มีการเกาะกลุ่มกันอย่างหลวมๆ จากพื้นที่เนื้อเมืองเดิม และกระจายไปตามโครงข่ายถนนที่เชื่อมโยงกับกรุงเทพมหานคร ปรากฏการณ์ดังกล่าวพบในพื้นที่จังหวัดสมุทรสาครและจังหวัดนครปฐม ในเส้นทางที่เชื่อมโยงกับกรุงเทพมหานคร

การขยายตัวของกรุงเทพมหานครในอนาคต จะมีการขยายตัวของประชากรออกไปอยู่บริเวณรอบนอกของศูนย์กลางเมืองตามบริเวณชานเมืองและปริมณฑลจึงทำให้เกิดศูนย์กลางเมืองใหม่ๆ เกิดขึ้นตามลักษณะการตั้งถิ่นฐานของประชากร ตามบริเวณเส้นทางการคมนาคมสายหลักที่เชื่อมโยงระหว่างศูนย์กลางชุมชนขนาดใหญ่รวมทั้งที่อยู่อย่างกระจัดกระจายในพื้นที่ด้านใน ซึ่งมีระบบสาธารณูปโภคที่ไม่เพียงพอ ซึ่งได้เรียกพื้นที่เหล่านี้ว่า เป็น เขตขยายตัวของกรุงเทพฯ (Extended Bangkok Region: EBR) มีการสร้างบ้านจัดสรร และอาคารพาณิชย์ในพื้นที่รอบนอกกรุงเทพมหานครเป็นจำนวนมาก ในขณะที่บริเวณศูนย์กลางกรุงเทพมหานคร (City core) มีการสร้างอาคารขนาดใหญ่เพื่อเป็นสำนักงาน โรงแรม คอนโดมิเนียม และศูนย์กลางค้าที่มีระดับเกิดขึ้นอย่างมากมาย

จำนวนประชากรของกรุงเทพฯ และปริมณฑล รวมถึงจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุกจังหวัด และทั้งในช่วงระยะเวลา 5 ปีข้างหน้าใน พ.ศ. 2555 10 ปี ข้างหน้า ใน พ.ศ. 2560 20 ปี ข้างหน้า ใน พ.ศ. 2560 หรือในอีก 30 ปีข้างหน้า ใน พ.ศ. 2580 รวมไปถึงในอีก 50 ปีข้างหน้า ใน พ.ศ. 2600 โดยภาพอนาคตของภาคกรุงเทพฯ และปริมณฑลจะสะท้อนจากการกำหนดผังกลยุทธ์ในระยะ 5-20 ปีข้างหน้า ในภาพรวมยังคงเป็นแผนงานต่อเนื่อง เพื่อสนับสนุนบทบาทและความสำคัญในแต่ละด้านให้ดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการติดตามและประเมินผล และเพิ่มเติมในพื้นที่เป้าหมายอื่นๆ เพื่อขยายฐานพื้นที่ของการพัฒนาให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น การพัฒนาจะเน้นการบรรลุสู่เป้าหมายการมีคุณภาพชีวิตที่ดีของประชาชนทั้งในพื้นที่เมืองและชนบท ซึ่งจะเป็นการวางรากฐานการพัฒนาในทุกด้านเพื่อนำไปสู่ภาพอนาคตของภาคกรุงเทพฯ และปริมณฑล รวมถึงจังหวัดพระนครศรีอยุธยาในปี พ.ศ. 2570 ต่อเนื่องไปจนถึงในปี พ.ศ. 2600 ให้สัมฤทธิ์ผลต่อไป

2) **จากการศึกษาในเรื่องสภาพการใช้ที่ดินของพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลที่ผ่านมา** ซึ่งประกอบด้วยการพัฒนาของภูมิภาค การใช้ประโยชน์ที่ดิน การขยายตัวทั้งในอดีต ปัจจุบัน และอนาคต จะเห็นได้ว่ากรุงเทพฯ และปริมณฑลมีระดับความเป็นเมืองสูง (High urbanization) และเมื่อเปรียบเทียบกันเองระหว่างจังหวัดกรุงเทพฯ และจังหวัดในปริมณฑล กรุงเทพฯ

จะเป็นศูนย์กลางของความเจริญเติบโต โดยการเติบโตทั้งในแนวตั้ง คือ มีอาคารสูงและอาคารขนาดใหญ่ รวมถึงการแผ่กระจายไปยังเมืองเล็กโดยรอบและพื้นที่เกษตร ในแนวราบคือ ความต้องการพื้นที่เมือง (Urban spatial demand) เกิดจากการเพิ่มของประชากรเป็นปัจจัยสำคัญ ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของพาณิชยกรรม ที่อยู่อาศัย และอุตสาหกรรม มีการเพิ่มและเปลี่ยนแปลงประเภทอาคารและการใช้อาคาร (Building types) และการก่อสร้างสาธารณูปโภคและสาธารณูปการ เป็นลักษณะของการเติบโตของเมือง (Urban growth) ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์ถึงน้ำหนักอาคาร (Load of building) ข้อมูลและการวิเคราะห์ทั้งในระดับมหภาค (การศึกษากรุงเทพฯและปริมณฑล) และจุลภาค ได้เลือกพื้นที่ตัวแทนตามสภาพการใช้ที่ดินและความหนาของชั้นดินเหนียว (จากการสำรวจ 4 พื้นที่ตัวแทนตามลักษณะการใช้ที่ดินและลักษณะดิน กล่าวคือ ศาลากลางจังหวัด (จ. สมุทรสาคร)ตัวแทนการใช้ที่ดินแบบพื้นที่เมืองเล็กและมีการขยายตัวช้า มีลักษณะดินเป็นดินเหนียวหนา เขตลาดกระบัง (กรุงเทพมหานคร) ตัวแทนการใช้ที่ดินแบบพื้นที่เกษตรชานเมือง มีลักษณะดินเป็นดินเหนียวบาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (กรุงเทพมหานคร) ตัวแทนการใช้ที่ดินแบบพื้นที่ชั้นในมหานคร ดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวหนา อ. บางพลี (จ. สมุทรปราการ) พื้นที่เมืองเล็กและมีการขยายตัวเร็ว มีลักษณะดินเป็นดินเหนียวหนา) เพื่อนำมาเป็นข้อมูลฐาน (Base information) ของการกำหนดน้ำหนักอาคารในพื้นที่ต่อไป นอกจากนี้แล้วผลการศึกษาเมื่อบูรณาการกับด้านอื่นๆ แล้ว ทำให้ทราบถึงลักษณะความเป็นเมืองและการเติบโตของเมืองทั้งในเชิงกายภาพและประชากร ปัญหาของเมือง การผังเมืองของประเทศไทย รวมถึงประเด็นหลัก คือ ความสัมพันธ์ของความเป็นเมืองกับการทรุดตัวของแผ่นดิน ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำให้เกิดข้อเสนอแนะมาตรการทางผังเมือง ซึ่งเป็นมาตรการสำคัญประการหนึ่งในการแก้และป้องกันปัญหาหลักจากการตระหนักรู้ถึงสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

3. การศึกษาสภาพน้ำบาดาล

ข้อมูลสภาพน้ำบาดาลเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเข้าใจสภาพของพื้นที่ศึกษา และใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ข้อมูลที่นำมาศึกษาในกลุ่มงานด้านสภาพน้ำบาดาล มีทั้งในส่วนที่เป็นข้อมูลทุติยภูมิรวบรวมจากหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ทำการสำรวจและจัดทำแผนที่ไว้ และข้อมูลอีกส่วนหนึ่งที่ยังไม่ได้มีการศึกษาและรวบรวมไว้ คณะที่ปรึกษาได้ดำเนินการรวมรวมและวิเคราะห์ เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาสภาพการทรุดตัวของแผ่นดินในขั้นต่อไป

3.1 จำนวนบ่อและสภาพระดับน้ำบาดาล

สภาพระดับน้ำบาดาลในอดีตตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521–2550 โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วงเวลา ช่วงแรกเริ่มตั้งแต่มีการเก็บข้อมูล (ปี พ.ศ. 2521-2541) ส่วนช่วงที่สองเป็นช่วงเวลาที่มีการพัฒนาเติบโตทางเศรษฐกิจ เริ่มการใช้น้ำบาดาลทั้งภาคเกษตร ครัวเรือนและอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ปี พ.ศ. 2542-2546) และช่วงที่สามจะพิจารณาในส่วนของจำนวนบ่อน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น และการสูบน้ำบาดาลลดลง (ปี พ.ศ. 2547-2550) ซึ่งสามารถสรุปผลของระดับน้ำบาดาลเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ช่วงระดับน้ำเฉลี่ยแต่ละช่วงเวลา (หน่วย: เมตร รทก.)

ชั้นน้ำ	ระดับน้ำ 2521-2541	ระดับน้ำ 2542-2546	ระดับน้ำ 2547-2550
PD	-11.22 ถึง -60.59	-2.81 ถึง -46.06	-7.87 ถึง -47.28
NL	-3.69 ถึง -68.80	-14.38 ถึง -90.58	-9.78 ถึง -43.08
NB	-4.54 ถึง -73.77	-12.21 ถึง -94.06	-8.34 ถึง -60.82

3.2 การทรุดตัวของแผ่นดิน

3.2.1 สรุปสภาพน้ำบาดาลและความสัมพันธ์กับการทรุดตัวของแผ่นดินทั้งพื้นที่

การพิจารณาระดับน้ำบาดาล และการทรุดตัวของแผ่นดินตามตำแหน่งของสถานีวัดการทรุดตัวของแผ่นดินจำนวน 36 สถานี จากปีพ.ศ. 2521-2550 พบว่า สภาพน้ำบาดาลและการทรุดตัวจากลักษณะดังกล่าวสามารถแบ่งพื้นที่ออกได้เป็น 3 โซน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สรุปความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำและการทรุดตัวของแผ่นดิน กรุงเทพมหานครและปริมณฑล (พ.ศ. 2521 – 2550)

โซน	พื้นที่	ระดับน้ำบาดาล	อัตราการทรุดตัว	ความสัมพันธ์ของระดับน้ำบาดาลกับอัตราการทรุดตัว
1	กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ นนทบุรี -บางกรวย (CI1-1) นครปฐม -พุทธมณฑล (CI 37-1) สมุทรสาคร -เมืองสมุทรสาคร (CI32-1) นนทบุรี -ปากเกร็ด (CI 7-1) -เมืองนนทบุรี (CI 33-1) ปทุมธานี -คลองหลวง (CI 25-1) -ธัญบุรี (CI 58-1)	ระดับน้ำบาดาลสูงขึ้นหลังปี พ.ศ. 2546	อัตราทรุดตัวลดลง อัตราทรุดตัวคงที่	ระดับน้ำมีผลต่ออัตราการทรุดตัวภายใน 3 ปี
2	สมุทรสาคร -บ้านแพ้ว (CI 49-1,CI 54-1) นนทบุรี -ไทรน้อย (CI 34-1) นครปฐม -บางเลน (CI 42-1) -ดอนตูม (CI 43-1,CI 44-1) -นครชัยศรี (CI 45-1, CI 50-1,CI 51-1) ปทุมธานี -เมืองปทุมธานี (CI 41-1)	ระดับน้ำคงที่	อัตราทรุดตัวสูงขึ้น อัตราทรุดตัวคงที่	ระดับน้ำมีผลต่ออัตราการทรุดตัวตั้งแต่ 3 ปี หรือไม่มีความสัมพันธ์
3	ปทุมธานี -ลำลูกกา (CI 59-1)	ระดับน้ำลดลง	อัตราทรุดตัวสูงขึ้น	ไม่มีความสัมพันธ์

3.2.2 สรุปความสัมพันธ์ของสภาพน้ำบาดาลกับการทรุดตัวของแผ่นดินรายสถานี

จากการพิจารณาการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่ตัวแทนจำนวน 4 จุด ที่ทำการศึกษาสภาพการทรุดตัวเพื่อเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินกับอัตราการสูบน้ำบาดาลและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลพบว่า

1. **ศาลากลางจังหวัด อ.เมือง จ.สมุทรสาคร** มีอัตราการใช้น้ำทั้งพื้นที่รายอำเภอที่เพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521-2539 และลดลงในปี พ.ศ. 2540 พบว่าระดับน้ำในชั้นน้ำพระประแดงและชั้นน้ำนครหลวงเริ่มคงที่และมีการแกว่งตัวในช่วง 5 เมตร ในปี พ.ศ. 2539 และระดับน้ำยกตัวสูงขึ้น ในปี พ.ศ. 2546 โดยอัตราการทรุดตัวคงที่มาอย่างต่อเนื่องและอัตราการทรุดตัวเริ่มลดลงในปี พ.ศ. 2548 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระดับน้ำบาดาลกับอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน พบว่ามีช่วงห่างของระยะเวลาประมาณ 2 ปี

2. **สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร** มีอัตราการใช้น้ำทั้งพื้นที่รายอำเภอลดลงในปี พ.ศ. 2539 พบว่าระดับน้ำในชั้นน้ำพระประแดงและชั้นน้ำนครหลวงคงที่และมีการแกว่งตัวในช่วงแคบๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538-2540 และยกตัวสูงขึ้นในปี พ.ศ. 2546 เรื่อยมา โดยอัตราการทรุดตัวคงที่อย่างต่อเนื่อง และลดลงอีกครั้งในปี พ.ศ. 2548 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระดับน้ำบาดาลกับอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน พบว่ามีช่วงห่างของระยะเวลาประมาณ 2 ปี

3. **จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน จ.กรุงเทพมหานคร** มีอัตราการใช้น้ำทั้งพื้นที่รายอำเภอที่เริ่มลดลงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 พบว่าระดับน้ำในชั้นน้ำพระประแดงและชั้นน้ำนครหลวงคงที่ในปี พ.ศ. 2530-2540 และมีการยกตัวสูงขึ้น ในปี พ.ศ. 2541 โดยอัตราการทรุดตัวคงที่อย่างต่อเนื่องและลดลงอีกครั้งปี พ.ศ. 2541 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระดับน้ำบาดาลกับอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน พบว่ามีช่วงห่างของระยะเวลาน้อยกว่า 1 ปี

4. **วัดบางพลีใหญ่กลาง อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ** มีอัตราการใช้น้ำทั้งพื้นที่รายอำเภอที่เพิ่มมากขึ้นในปี พ.ศ. 2521-2534 และเริ่มลดลงในปี พ.ศ. 2536 พบว่าระดับน้ำในชั้นน้ำพระประแดงและชั้นน้ำนครหลวงเริ่มคงที่ในปีพ.ศ. 2530-2540 และมีการยกตัวสูงขึ้น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 โดยอัตราการทรุดตัวคงที่อย่างต่อเนื่อง และลดลงอีกครั้งปี พ.ศ. 2541 ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ของระดับน้ำบาดาลอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน มีช่วงห่างของระยะเวลาน้อยกว่า 1 ปี

การศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินช่วงเวลาในอดีตดังกล่าว เพื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระดับน้ำบาดาลและการทรุดตัวของแผ่นดิน จึงจำลองสภาพระดับน้ำบาดาลในอนาคต 20 ปีข้างหน้า จากปี พ.ศ. 2551-2570 โดยจำลองสภาพเหตุการณ์ออกเป็น 3 กรณีคือ

- กรณีที่ 1 จำลองค่าระดับน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2551-2570 การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปาสามารถบริการหรือจ่ายน้ำได้ในพื้นที่ศึกษาในอนาคต ซึ่งพิจารณาถึงการขยายตัวของพื้นที่ให้บริการประปาในอนาคตด้วยอัตราการสูบ 1,386,411 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2570
- กรณีที่ 2 จำลองค่าระดับน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2551-2570 การสูบน้ำบาดาลในกรณีที่ควบคุมการใช้น้ำบาดาลไม่ให้เกินอัตราการสูบ 800,000 ลบ.ม./วัน
- กรณีที่ 3 จำลองค่าระดับน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2551-2570 การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปา และพิจารณาโครงการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา (ในอัตรา 500,000 ลบ.ม.ต่อวัน) รวมเป็นอัตราการสูบสุทธิเท่ากับ 886,411 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2570

ผลการพิจารณาการใช้น้ำในอนาคตทั้ง 3 กรณีดังกล่าวข้างต้น ปริมาณการใช้น้ำในกรณีที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้ระดับของน้ำบาดาลได้รับผลกระทบในระยะยาวมีแนวโน้มโดยมีค่าลดต่ำลงมากขึ้นใน 3 ชั้นน้ำหลัก รองลงมาเป็นกรณีที่ 3 และกรณีที่ 2 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ช่วงระดับน้ำเฉลี่ยในอนาคตแต่ละกรณี (พ.ศ. 2551-2570)

ชั้นน้ำ	ระดับน้ำ (เมตร รทก.)		
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
PD	-11.23 ถึง -45.20	-4.81 ถึง -34.22	-8.32 ถึง -43.64
NL	-10.32 ถึง -50.62	-7.59 ถึง -46.25	-9.48 ถึง -49.64
NB	-10.21 ถึง -53.78	-6.32 ถึง -38.97	-7.63 ถึง -51.99

4. การทบทวนข้อมูลและการวิเคราะห์สภาพแผ่นดินทรุด

การทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ถึงแม้ว่าจะเป็นปัจจัยที่มีขนาดและลักษณะคล้ายคลึงกัน ก็สามารถทำให้ชั้นดินต่างๆ ทรุดตัวลงด้วยอัตราและขนาดที่แตกต่างกันได้ ปัจจัยที่ทำให้ดินเกิดการทรุดตัวได้แก่การลดลงของแรงดันน้ำซึ่งจะมีผลทำให้หน่วยแรงกระทำภายในชั้นดิน (หน่วยแรงประสิทธิผล) มีค่ามากขึ้น โดยหากสามารถวัดค่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปและทราบค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินก็จะสามารถคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำได้ซึ่งการศึกษาสภาพการทรุดตัวของแผ่นดินได้มีการรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเอกสารและข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง

ในการสร้างแบบจำลองการทรุดตัวและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวนั้น จำเป็นจะต้องมีการเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการตรวจวัดจริงในสนาม เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองนั้น นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบจากผลการตรวจวัดจริงยังทำให้สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์อันจะทำให้ผลการทำนายของแบบจำลองใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้นในการดำเนินงานของโครงการมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการตรวจวัดจริงในสนามในพื้นที่ตัวแทนจำนวน 4 แห่ง และเนื่องจากหมุดหลักฐานที่หน่วยงานของรัฐได้จัดทำไว้ส่วนใหญ่เป็นหมุดหลักฐานสำหรับการตรวจวัดในระดับลึก จึงไม่สามารถนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาใช้เทียบกับผลการวิเคราะห์ที่จะดำเนินการในโครงการนี้ได้อย่างสมบูรณ์

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการเปรียบเทียบผลและการคำนึงถึงความคุ้มค่าในการจัดการดังนั้นจึงได้วางแผนให้มีการจัดทำและติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัวและแรงดันน้ำสำหรับชั้นดินในระดับตื้น (ซึ่งได้แก่ชั้นดินที่อยู่ภายในระดับความลึก 30 เมตรจากผิวดิน) ในบริเวณเดียวกันกับสถานีตรวจวัดข้อมูลระดับลึกที่มีอยู่แล้วเพื่อทำให้ได้ภาพรวมการทรุดตัวที่สมบูรณ์ นอกจากนี้สถานีตรวจวัดที่จะจัดทำขึ้นนี้ยังมีความคงทน สามารถใช้ในการเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงประจำปีได้ด้วย

4.1 โครงสร้างชั้นดิน

ในการศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลจากการเจาะสำรวจดินใน 7 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา นครปฐม สมุทรปราการ และสมุทรสาครจำนวนทั้งหมด 140 หลุมซึ่งมีความลึกประมาณ 30 – 50 เมตร และสามารถสรุปเป็นโครงสร้างโดยสังเขปได้ดังนี้

ชั้นดินในบริเวณกรุงเทพฯ ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) หนาประมาณ 13 – 15 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็ง (Medium stiff to stiff clay) หนาประมาณ 8 –

10 เมตร หลังจากนั้นจะพบชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) และชั้นทรายหนาประมาณ 10–15 เมตร โดยชั้นดินของจังหวัดนนทบุรีประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 12–15 เมตร ซึ่งในบางพื้นที่จะพบชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่ที่ระดับความลึก 2–6 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางแข็งหนาประมาณ 8–10 เมตร ถัดจากนั้นจะเป็นชั้นทรายหนาประมาณ 10 – 15 เมตร สำหรับชั้นดินในจังหวัดปทุมธานีประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 8–10 เมตร แต่อาจจะพบชั้นทรายแทรกอยู่บ้าง ต่อจากนั้นจะพบชั้นทรายหนาประมาณ 5 – 10 เมตร และโครงสร้างชั้นดินของจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีความแปรปรวนค่อนข้างสูงเนื่องจากเคยเป็นชายฝั่งทะเลเก่า โดยพบชั้นดินเหนียวอ่อนบางมากประมาณ 3-5 เมตร หรือในบางพื้นที่อาจไม่พบเลย หลังจากนั้นจะพบชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 8–10 เมตร และถัดมาจะเป็นชั้นทรายหนาประมาณ 5–10 เมตร

ชั้นดินในจังหวัดนครปฐมประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 8–10 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 5–8 เมตร หลังจากนั้นจะพบชั้นทรายหนาประมาณ 5–10 เมตร นอกจากนี้ชั้นดินในจังหวัดสมุทรปราการประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนามากประมาณ 15 – 16 เมตร สะสมตัวบนชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งมากหนาประมาณ 10 – 15 เมตร ตามด้วยชั้นทรายหนาประมาณ 5 – 10 เมตร และชั้นดินในจังหวัดสมุทรสาครประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 14 – 16 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งสลับกันหนาประมาณ 8 – 10 เมตร สำหรับชั้นดินนี้ในบางพื้นที่จะพบชั้นทรายแทรกอยู่ที่มีความหนาประมาณ 15 – 20 เมตร

4.2 *สภาพการทรุดตัวของแผ่นดิน*

จากการรายงานการตรวจวัดระหว่างปี พ.ศ. 2521 – 2524 พบว่าการยุบอัดตัวในชั้นดินเหนียวด้านบน (ในช่วงประมาณ 50 เมตรจากผิวดิน) มีค่าประมาณ 40 % ของการทรุดตัวทั้งหมด โดยการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2463 – 2523 มีค่าประมาณ 50 - 60 ซม. ดังเช่น การทรุดตัว ณ สถานีตรวจวัดค่าการทรุดตัวมหาวิทยาลัยรามคำแหง สำหรับภาพรวมของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยแยกสภาพการทรุดตัวตามเวลา โดยสรุปได้ดังนี้

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 – 2525 พื้นที่ด้านทิศตะวันออกของกรุงเทพฯ เช่น เขตบางกะปิ และเขตลาดกระบังมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 9 ซม./ปี โดยอัตราการทรุดตัวที่มากที่สุดสูงถึง 10 ซม./ปี สำหรับพื้นที่ด้านตะวันตกของกรุงเทพฯ เช่น เขตพระนคร เขตธนบุรี เขตหนองแขม การทรุดตัวเกิดขึ้นน้อยมากโดยมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.9 ซม./ปี พื้นที่ด้านทิศเหนือของกรุงเทพฯ มีค่าเฉลี่ยการทรุดตัวประมาณ 5.5 ซม./ปี ซึ่งอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยในตอนกลางของกรุงเทพฯ มีค่าประมาณ 4.1 ซม. /ปี ในเขตปริมณฑล เช่น พื้นที่จังหวัดนนทบุรี อัตราการทรุดตัวเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.6 ซม. /ปี

ในช่วงปี พ.ศ. 2526 – 2530 พื้นที่ด้านทิศตะวันออกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2 ซม./ปี พื้นที่ด้านตะวันตกของกรุงเทพฯ มีการทรุดตัวเกิดขึ้นน้อยมากโดยมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.1 ซม./ปี พื้นที่ด้านทิศเหนือของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 5.5 ซม./ปี ในพื้นที่ส่วนในของกรุงเทพฯ เช่น สถานี ST8 (คณะพาณิชยศาสตร์ฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) อัตราการทรุดตัวเฉลี่ยมีค่าประมาณ 0.8 ซม./ปี พื้นที่จังหวัดนนทบุรีมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.4 ซม./ปี พื้นที่จังหวัดปทุมธานีมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.9 ซม./ปี จังหวัดสมุทรปราการที่สถานี ST30 (วัดบางพลีใหญ่กลาง) มีอัตราการทรุดตัวประมาณ 4.6 ซม./ปี จังหวัดสมุทรสาครที่สถานี ST32 (ศาลากลางจังหวัดสมุทรสาคร) มีอัตราการทรุดตัวประมาณ 1.0 ซม./ปี และจังหวัดนครปฐม ที่สถานี ST36 (พุทธมณฑล อ.พุทธมณฑล) มีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.5 ซม./ปี

ในช่วงปี พ.ศ. 2531 – 2535 พื้นที่ด้านทิศตะวันออกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2.2 ซม./ปี พื้นที่ด้านตะวันตกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.5 ซม./ปี พื้นที่ด้านทิศเหนือของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.9 ซม./ปี ในพื้นที่ส่วนในของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.0 ซม./ปี พื้นที่จังหวัดนนทบุรีมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.4 ซม./ปี พื้นที่จังหวัดปทุมธานีมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.5 ซม./ปี จังหวัดสมุทรปราการมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 4.9 ซม./ปี จังหวัดสมุทรสาครมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.2 ซม./ปี และจังหวัดนครปฐมมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.6 ซม./ปี

ในช่วงปี พ.ศ. 2536 – 2540 พื้นที่ด้านทิศตะวันออกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2.4 ซม./ปี พื้นที่ด้านตะวันตกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.4 ซม./ปี พื้นที่ด้านทิศเหนือของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2.9 ซม./ปี ในพื้นที่ส่วนในของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.5 ซม./ปี พื้นที่จังหวัดนนทบุรีเริ่มมีการคืนตัว (Rebound) โดยสถานี ST34 (โรงเรียนวัดไทรใหญ่ อ.ไทรน้อย) มีอัตราการคืนตัวประมาณ 0.4 ซม./ปี พื้นที่ จังหวัดปทุมธานีเริ่มมีการคืนตัวโดยสถานี ST35 (ศาลากลางจังหวัด) มีอัตราการคืนตัวประมาณ 0.9 ซม./ปี จังหวัดสมุทรปราการมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 6.3 ซม./ปี จังหวัดสมุทรสาครมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.5 ซม./ปี และจังหวัดนครปฐมมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.0 ซม./ปี

ในช่วงปี พ.ศ. 2541–2545 พื้นที่ด้านทิศตะวันออกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.4 ซม./ปี พื้นที่ด้านตะวันตกของกรุงเทพฯ เกิดการคืนตัวในบางบริเวณขึ้นเช่น สถานี ST19 (สถานีโทรทัศน์สีช่อง 3 หนองแขม) มีอัตราการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 0.4 ซม./ปี พื้นที่ด้านทิศเหนือของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.4 ซม./ปี ในพื้นที่ส่วนในของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0.9 ซม./ปี พื้นที่จังหวัดนนทบุรีมีการคืนตัวประมาณ 0.3 ซม./ปี พื้นที่ จังหวัดปทุมธานีมีอัตราการคืนตัวประมาณ 0.5 ซม./ปี จังหวัดสมุทรปราการมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.3 ซม./ปี

จังหวัดสมุทรสาครมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.0 ซม./ปี และจังหวัดนครปฐมมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 1.6 ซม./ปี

ในช่วงปี พ.ศ. 2546 – 2548 พื้นที่ด้านทิศตะวันออกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2.4 ซม./ปี พื้นที่ด้านตะวันตกของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.5 ซม./ปี พื้นที่ด้านทิศเหนือของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.5 ซม./ปี ในพื้นที่ส่วนในของกรุงเทพฯ มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2.4 ซม./ปี พื้นที่จังหวัดนนทบุรีมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.3 ซม./ปี พื้นที่ จังหวัดปทุมธานีมีอัตราการคืนตัวประมาณ 2.4 ซม./ปี จังหวัดสมุทรปราการมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.0 ซม./ปี จังหวัดสมุทรสาครมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 2.0 ซม./ปี และจังหวัดนครปฐมมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 1.6 ซม./ปี

4.3 ข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดิน

จากฐานข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี ซึ่งได้ร่วมกับกองรังวัดตรวจสอบสภาพการทรุดตัวของบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลและหมุดหลักฐานทั่วบริเวณเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลตั้งแต่ปีงบประมาณ 2533 พบว่าในปัจจุบันมีการสูบน้ำจากชั้นน้ำบาดาลต่างๆ 8 ระดับตั้งแต่ระดับ 20-500 ม. จากระดับผิวดิน และมีแนวโน้มที่จะทำการสูบในระดับที่ลึกลงไปเรื่อยๆ การสูบน้ำดังกล่าวทำให้แรงดันในชั้นน้ำบาดาลลดลงเป็นอย่างมากเช่น ในระหว่างปี พ.ศ. 2531-2536 ผิวแรงดันน้ำในชั้นน้ำนครหลวงได้ลดลงจากระดับ 54 ม. ไปเป็น 68 ม. จากระดับผิวดิน และผิวแรงดันน้ำในชั้นน้ำนนทบุรีได้ลดลงจากระดับ 38 เมตร ไปเป็น 64 เมตร จากระดับผิวดิน ข้อมูลจากการสำรวจได้แสดงให้เห็นว่าจุดที่มีการลดระดับของผิวแรงดันน้ำมากที่สุดอยู่ในบริเวณจังหวัดสมุทรปราการและสมุทรสาคร

จากข้อมูลแรงดันน้ำใต้ดินในปี พ.ศ. 2540 ของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคลของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ซึ่งได้ติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำไว้ทุกสถานี พบว่าแรงดันน้ำที่ระดับประมาณ 22 เมตรจากผิวดินมีค่าลดต่ำลงจนเท่ากับศูนย์ซึ่งเป็นผลให้หน่วยแรงประสิทธิผลในชั้นดินเหนียวอ่อนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการทรุดตัวเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำที่ระดับดังกล่าวรวมทั้งชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป จากข้อมูลของโครงการก่อสร้างท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการพบว่า แรงดันน้ำใต้ดินบริเวณท่าอากาศยานสุวรรณภูมิในช่วงก่อนก่อสร้าง (ปี พ.ศ. 2544) มีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับที่พบในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล โดยค่าแรงดันน้ำต่ำสุดอยู่ที่ระยะประมาณ 18 – 20 เมตร ผลการศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และกรมทรัพยากรธรรมชาติ ยังพบการทรุดตัวบนชั้นดินเหนียวอ่อนมากบริเวณวัดราชศรัทธาธรรม เขตพระโขนง ในช่วงพ.ศ. 2529 – 2540 มีค่าประมาณ 203.8 มิลลิเมตร

หรือการทรุดตัวบริเวณ ป้อมพระจุลจอมเกล้า อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ในช่วงปี พ.ศ. 2529 – 2540 ซึ่งมีค่าประมาณ 155.2 มิลลิเมตร

จากการศึกษาพบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2521-2542 การทรุดตัวสะสมของชั้นดินมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 ซม. จนถึง 90 ซม. ในบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาฝั่งซ้ายพบว่ามีการทรุดตัวสะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 ประมาณ 50 ซม. และ ในระหว่างปีพ.ศ. 2535-2543 มีการทรุดตัวในบริเวณเดียวกันเกิดขึ้นประมาณ 20-28 ซม. ในช่วงปี พ.ศ. 2523-2533 กรมทรัพยากรธรณีได้รายงานไว้ว่ามีการทรุดตัวเฉลี่ยถึง 5-10 ซม.ต่อปี และได้ลดลงเหลือประมาณ 1.5-2 ซม. ต่อปี ในช่วงปี พ.ศ. 2534-2543 ทั้งนี้เนื่องจากมาตรการต่างๆ ของรัฐที่พยายามจะจำกัดปริมาณการใช้น้ำบาดาลให้น้อยลง อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าอัตราการทรุดตัวในบริเวณรอบนอกของกรุงเทพฯกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากยังเป็นพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและยังมีปริมาณการใช้น้ำบาดาลที่สูงอยู่

จากข้อมูลการตรวจวัดของกรมแผนที่ทหาร สามารถสรุปสถานภาพการทรุดตัวของแผ่นดินโดยแบ่งออกเป็นสองประเด็นคือ ก) สถานภาพการทรุดตัวเมื่อพิจารณาเฉพาะการทรุดตัวของผิวดิน และ ข) สถานภาพการทรุดตัวเมื่อพิจารณาแยกตามชั้นดิน จากผลการตรวจวัดที่รวบรวม พบว่าการทรุดตัวของผิวดินส่วนใหญ่ในปัจจุบันมีค่าประมาณ 0–2 ซม./ปี โดยพื้นที่ที่ยังคงมีการทรุดตัวด้วยอัตราที่มากกว่า 2 ซม./ปี ได้แก่ บริเวณสถานีตรวจวัดบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี องค์การบริหารส่วนจังหวัดสมุทรสาคร และศาลากลางจังหวัดปทุมธานี (สถานีที่ 22 32 และ 35 ตามลำดับ) นอกจากนี้ยังพบว่ามีแผ่นดินมีการคืนตัวหรือมีระดับที่สูงขึ้นเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 ซม./ปี) ในบางพื้นที่เช่น สถานีตรวจวัดบริเวณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางกรวย) กองบินตำรวจ (รามอินทรา) กรมชลประทาน (ปากเกร็ด) คลังพัสดุการเคหะฯ (คลองจั่น) ศาลากลางจังหวัดนนทบุรี วัดไทรใหญ่ (จ. นนทบุรี) และ วัดเทียนถวาย (ปากคลองรังสิต) (สถานีที่ 1 16 17 18 33 34 และ 41 ตามลำดับ) เนื่องจากระดับแรงดันน้ำมีระดับที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาการยุบอัดตัวในระดับความลึกต่างๆ พบว่า เริ่มมีการคืนตัวในชั้นดินระดับลึกตั้งแต่ 20 เมตรลงไปด้วยอัตราการคืนตัวปานกลาง (1 - 2 ซม./ ปี) อย่างไรก็ตามการยุบอัดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งอยู่ในระดับตื้นซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ผลจากการคืนตัวของชั้นดินในระดับลึกไม่เด่นชัด

4.4 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัว

4.4.1 การวิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นน้ำจากข้อมูลการสำรวจชั้นดิน

เนื่องจากการวิเคราะห์ของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียในอดีตนั้นมุ่งเน้นไปที่การยุบอัดตัวในระดับมากกว่า 100 เมตร แต่คณะที่ปรึกษามีสมมุติฐานว่าในปัจจุบันการยุบอัดตัวในระดับลึกจะมีค่าน้อยกว่าการยุบอัดตัวในชั้นดินตื้น ในการศึกษานี้จึงได้วิเคราะห์เพิ่มโดยใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำในสภาพ 1 มิติที่เสนอโดยเทอร์ซากิ โดยมีวัตถุประสงค์ในการแยกแยะว่าการยุบอัดตัวที่เกิดขึ้นในระดับ 0-50 เมตรกับส่วนที่อยู่ลึกระหว่าง 50-250 เมตรมีสัดส่วนต่อกันเป็นเท่าใด โดยในโครงการศึกษาครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้เจาะสำรวจดินพร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวของดินและเครื่องมือวัดแรงดันน้ำเพิ่มเติมในสถานีตรวจวัดที่มีอยู่เดิมจำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานีศาลากลางจังหวัด จ.สมุทรสาคร สถานีคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถานีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถานีวัดบางพลีใหญ่กลาง จ. สมุทรปราการ ทั้งนี้ได้ดำเนินการติดตั้งมาตรวัดโดยเน้นการตรวจวัดในชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นพิเศษ โดยแต่ละสถานีนั้นประกอบไปด้วยจุดตรวจวัดการยุบตัวและการคืนตัวจำนวน 6 จุด และจุดตรวจวัดแรงดันน้ำจำนวน 5 จุด ซึ่งได้รับการออกแบบให้วางอยู่ในระดับความลึกที่เหมาะสม โดยพิจารณาถึงสภาพลักษณะชั้นดินจากข้อมูลการขุดเจาะสำรวจดินในสนามของแต่ละสถานี (ตารางที่ 4-1)

4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทรุดตัวของแผ่นดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและน้ำหนักดินถม

การติดตั้งเครื่องมือวัดส่วนใหญ่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการทรุดตัวในชั้นดินได้เกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นจึงได้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขประกอบกับการสอบเทียบด้วยผลการตรวจวัดจริงในบริเวณสถานีทั้ง 4 สถานีเพื่อศึกษาถึงสัดส่วนการยุบอัดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งอยู่ในระดับตื้นกับชั้นดินในระดับลึกซึ่งมีความแข็งมากกว่า ผลการศึกษาพบว่าการยุบอัดตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนระดับตื้น จากการคำนวณสำหรับบางสถานีพบว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดได้ แต่เมื่อเพิ่มปัจจัยเนื่องจากน้ำหนักดินถมและน้ำหนักที่เกิดจากอาคารในบริเวณใกล้เคียงแล้วสามารถคำนวณการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดเป็นอย่างดี โดยสถานีตรวจวัดที่ได้รับผลกระทบจากน้ำหนักดินถมและน้ำหนักอาคารได้แก่ สถานีตรวจวัดจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสถานีตรวจวัดสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อรวมอิทธิพลเนื่องจากน้ำหนักดินถม น้ำหนักอาคารและจากการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันน้ำเข้าด้วยกันแล้วพบว่าการยุบอัดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่ศึกษามีสัดส่วนประมาณ 85.36% ถึง 93.69% ของการทรุดตัวรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ตารางที่ 4-1)

ตารางที่ 4-1 สรุปการยุบอัดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดของ 4 สถานีตรวจวัด

ST	การยุบอัดตัวที่เกิดจากการลดลงของระดับน้ำ	การยุบอัดตัวชั้น 0-50 เมตร		
		การยุบอัดตัวที่เกิดจากการลดลงของระดับน้ำ	การยุบอัดตัวที่เกิดจากดินถม	การยุบอัดตัวรวม
8 จุฬาฯ	- การยุบอัดตัวชั้น 0-50 เมตร เท่ากับ 93.69% - การยุบอัดตัวที่ระดับมากกว่า 50 เมตร เท่ากับ 7.48% - การยุบอัดตัวชั้น 0-20 เมตร เท่ากับ 59.46%	77.68%	16.01%	93.69%
20 ลาดกระบัง	- การยุบอัดตัวชั้น 0-50 เมตร เท่ากับ 85.36% - การยุบอัดตัวที่ระดับมากกว่า 50 เมตร เท่ากับ 26.46% - การยุบอัดตัวชั้น 0-20 เมตร เท่ากับ 26.81%	40.67%	44.70%	85.36%
30* บางพลี	- การยุบอัดตัวชั้น 0-50 เมตร เท่ากับ 85.22% - การยุบอัดตัวที่ระดับมากกว่า 50 เมตร เท่ากับ 14.77% - การยุบอัดตัวชั้น 0-20 เมตร เท่ากับ 74.01%	85.22%	0%	85.22%
32* ศาลากลาง จ. สมุทรสาคร	- การยุบอัดตัวชั้น 0-50 เมตร เท่ากับ 74.79% - การยุบอัดตัวที่ระดับมากกว่า 50 เมตร เท่ากับ 25.21% - การยุบอัดตัวชั้น 0-20 เมตร เท่ากับ 4.48%	74.79%	0%	74.79%

หมายเหตุ: * หมายถึง ไม่พบประวัติการถมดิน

4.4.3 อิทธิพลจากการสูบน้ำบาดาลที่มีผลต่อการทรุดตัวของดิน

เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับน้ำในชั้นน้ำบาดาลต่าง กัน ดังนั้นจึงได้ศึกษาอิทธิพลจากการสูบน้ำ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ ผลกระทบจากการสูบน้ำในอดีตจนถึงปัจจุบัน และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณการสูบน้ำในอนาคต ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลจากการสูบน้ำบาดาลที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน จึงได้จำลองสถานการณ์การสูบน้ำตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คือ กรณีที่จำลองระดับน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2521-2550 ด้วยค่าสูบน้ำที่ปรับเทียบแล้ว (ตามจริง) ผลการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบการยุบอัดตัวที่ผิวดินภายใต้สถานการณ์การสูบน้ำของแต่ละสถานี (ตารางที่ 4-2) ได้ดังนี้

จากผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ST8) สามารถสรุปได้ว่า การทรุดตัวสะสมในปี พ.ศ. 2550 มีค่าเท่ากับ 147.94 เซนติเมตร สำหรับการพิจารณาการทรุดตัวที่ระดับ 0-50 เมตร และที่ระดับมากกว่า 50 มีค่าเท่ากับ 89.60% และ 10.40% ตามลำดับ สำหรับผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (ST20) สามารถสรุปได้ว่า การทรุดตัว ในปี พ.ศ. 2550 มีค่าเท่ากับ 47.06 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาการทรุดตัวที่ระดับ 0-50 เมตร และที่ระดับมากกว่า 50 เมตร การทรุดตัวจะมีค่าเท่ากับ 71.15 % และ 28.85% ตามลำดับ ส่วนผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานีตรวจวัด จ.สมุทรปราการ (ST30) สามารถสรุปได้ว่า การทรุดตัวในปี พ.ศ. 2550 มีค่าเท่ากับ 88.03 เซนติเมตร สำหรับการพิจารณาการทรุดตัวที่ระดับ 0-50 เมตร มีค่าเท่ากับ 79.80 % และที่ระดับมากกว่า 50 เมตร มีค่าเท่ากับ 20.20% และจากผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานีศาลากลาง จ.สมุทรสาคร (ST32) สามารถสรุปได้ว่า ค่าการทรุดตัวในปี พ.ศ. 2550 มีค่าเท่ากับ 77.21 เซนติเมตร และการยุบอัดตัวที่ระดับ 0-50 เมตร มีค่าเท่ากับ 66.63% ส่วนการยุบอัดตัวที่ระดับมากกว่า 50 เมตร มีค่าเท่ากับ 33.37%

จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณอัตราการทรุดตัวที่สถานีทั้ง 4 สถานีนั้น (ตารางที่ 4-2) ร้อยละของการยุบอัดตัวของชั้นดินระหว่างชั้นตื้น (0-20 เมตรและ 0-50 เมตร) ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับผลการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลระดับน้ำจากสถานีใกล้เคียงในหัวข้อที่ผ่านมา (ตารางที่ 4-1) ดังนั้นจึงจะนำผลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์กรณีอนาคตต่อไป

ตารางที่ 4-2 สรุปการยุบอัดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวในอดีตจนถึงปัจจุบัน (พ.ศ. 2550) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดของ 4 สถานีตรวจวัด

สถานี	การยุบอัดตัว (%) 0-50 เมตร	การยุบอัดตัว (%) มากกว่า 50 เมตร	การยุบอัดตัว (%) 0-20 เมตร
8	89.60	10.40	54.38
20	71.15	28.85	22.12
30	79.80	20.20	69.18
32	66.63	33.37	3.96

สำหรับการจำลองสถานการณ์การสูบน้ำในอนาคตได้แบ่งเป็น 3 กรณีคือ

- กรณีที่ 1 จำลองค่าระดับน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2551-2570 การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปาสามารถบริการหรือจ่ายน้ำได้ในพื้นที่ศึกษาในอนาคต ซึ่งพิจารณาถึงการขยายตัวของพื้นที่ให้บริการประปาในอนาคตด้วยอัตราการสูบ 1,386,411 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2570
- กรณีที่ 2 จำลองค่าระดับน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2551-2570 การสูบน้ำบาดาลในกรณีที่ควบคุมการใช้น้ำบาดาลไม่ให้เกินอัตราการสูบ 800,000 ลบ.ม./วัน
- กรณีที่ 3 จำลองค่าระดับน้ำบาดาลปี พ.ศ. 2551-2570 การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปา และพิจารณาโครงการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา (ในอัตรา 500,000 ลบ.ม.ต่อวัน) รวมเป็นอัตราการสูบสุทธิเท่ากับ 886,411 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2570

ซึ่งผลการศึกษาสรุปได้ดังตารางที่ 4-3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ST8) พบว่าการทรุดตัวจะยังคงเพิ่มขึ้นเมื่อการใช้น้ำเป็นไปตามกรณีที่ 1 โดย ณ ปี พ.ศ. 2570 จะมีการทรุดตัวสะสมที่ผิวดินมากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 166.62 เซนติเมตร เมื่อการใช้น้ำเป็นไปตามกรณีจำลองที่ 2 พบว่าการทรุดตัวของชั้นดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มาก โดยการทรุดตัวสะสม ณ ปี พ.ศ. 2570 จะมีค่าประมาณ 148.76 เซนติเมตรซึ่งเพิ่มจากการทรุดตัวสะสม ณ ปี พ.ศ. 2550 (147.94 เซนติเมตร) เพียง 0.82 เซนติเมตรเท่านั้น เมื่อจำลองการใช้น้ำตามกรณีที่ 3 ซึ่งมีการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาพบว่าชั้นดินจะมีการคืนตัวขึ้น โดยการทรุดตัวสะสม ณ ปี พ.ศ. 2570 จะมีค่าประมาณ 146.36 เซนติเมตรซึ่งหมายถึงระดับผิวดินจะมีระดับสูงขึ้นจากปี พ.ศ. 2550 (147.94 เซนติเมตร) ประมาณ 1.62 เซนติเมตร

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการยุบอัดตัวของชั้นดินระหว่างชั้นตื้นและชั้นลึกพบว่า การยุบอัดตัวที่ระดับ 0-50 เมตร ในกรณี 1 ถึงกรณี 3 มีค่าเท่ากับ 89.34% 90.32% และ 90.99% และการยุบอัดตัวที่ระดับมากกว่า 50 เมตร มีค่าเท่ากับ 10.66% 9.67% และ 9.01% ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาจากสัดส่วนของการยุบอัดตัวในชั้นลึกสำหรับกรณีที่ 3 ที่มีค่าลดลงได้ว่า ผลจากการเติมน้ำบาดาลจะทำให้เกิดการคืนตัวในชั้นดินระดับลึกและทำให้การยุบอัดตัวในชั้นดินดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ

จากผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (ST20) สามารถสรุปได้ว่า การทรุดตัวสะสมที่ผิวดิน ณ ปี พ.ศ. 2570 ของกรณีที่ 1 จะมีค่ามากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 61.12 เซนติเมตร เนื่องจากชั้นดินยังคงทรุดตัวเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการทรุดตัวสะสมที่ผิวดินของกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 พบว่าชั้นดินมีการยกระดับสูงขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวสะสมที่ผิวดินของกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 42.79 และ 35.45 เซนติเมตร กับค่าการทรุดตัวสะสม ณ ปี พ.ศ. 2550 พบว่าระดับผิวดินในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 มีค่าสูงขึ้น 4.27 เซนติเมตร และ 11.61 เซนติเมตร ตามลำดับ

สำหรับการพิจารณาการยุบอัดตัวที่ระดับ 0-50 เมตร ในกรณี 1 ถึงกรณี 3 มีค่าเท่ากับ 68.65% 67.72% และ 67.98% และในส่วนของการพิจารณาระดับมากกว่า 50 เมตร มีค่าเท่ากับ 31.35% 32.28% และ 32.02%

จากผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานี จ. สมุทรปราการ (ST30) สามารถสรุปได้ว่า การทรุดตัวที่เกิดจากกรณีที่ 1 ณ ปี พ.ศ. 2570 มีการทรุดตัวสะสมที่ผิวดินมากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 123.31 เซนติเมตร สำหรับการทรุดตัวในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ในปีเดียวกันกับข้างต้น มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 99.08 และ 91.33 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับการทรุดตัวสะสม ณ ปี พ.ศ. 2550 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 88.03 เซนติเมตร พบว่าชั้นดินยังคงทรุดตัวเพิ่มขึ้นทั้งสามกรณี โดยการทรุดตัวในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 มีค่าน้อยกว่าการทรุดตัวในกรณีที่ 1 เท่ากับ 19.65% และ 25.93% ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาการยุบอัดตัวที่ระดับ 0-50 เมตร ในกรณี 1 ถึงกรณี 3 มีค่าเท่ากับ 79.92% 81.12% และ 81.69% และในส่วนของการพิจารณาระดับมากกว่า 50 เมตร มีค่าเท่ากับ 20.07% 18.12% และ 18.31%

จากผลการคำนวณการทรุดตัวของสถานี จ. สมุทรสาคร (ST32) สามารถสรุปได้ว่า การทรุดตัวที่เกิดจากกรณีที่ 1 ณ ปี พ.ศ. 2570 มีการทรุดตัวสะสมที่ผิวดินมากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 90.27 เซนติเมตร สำหรับการทรุดตัวในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ในปีเดียวกันกับข้างต้น มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 73.61 และ 68.27 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับการทรุดตัวสะสม ณ ปี พ.ศ. 2550 ซึ่งมีค่า

เท่ากับ 77.21 เซนติเมตร พบว่าชั้นดินยังคงทรุดตัวเพิ่มขึ้นในกรณีที่ 1 แต่ระดับผิวดินในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 มีค่าสูงขึ้น 3.6 เซนติเมตร และ 8.94 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการคำนวณพบว่าการยุบอัดตัวที่ระดับ 0-50 เมตรของกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 63.71% 69.55% และ 73.84% และการยุบอัดตัวที่ระดับลึกกว่า 50 เมตรมีค่าเท่ากับ 32.29% 30.45% และ 26.16%

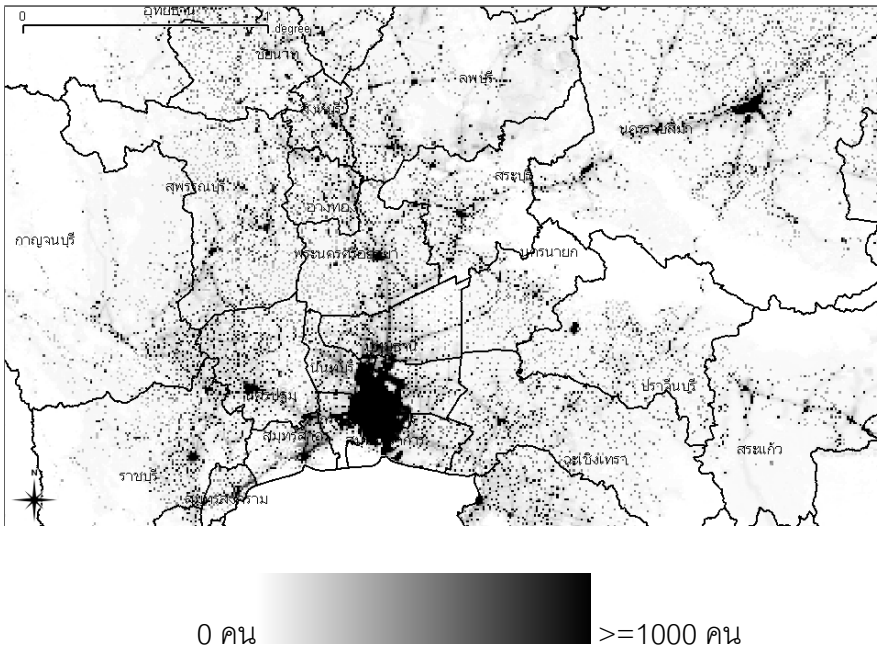
สำหรับในกรณีที่ 3 ซึ่งพบว่าระดับผิวดินของสถานีส่วนใหญ่จะมีการคืนตัวเนื่องจากระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นจากการเติมน้ำ อย่างไรก็ตามในสภาพจริงนั้นจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงอิทธิพลจากน้ำหนักกดทับจากอาคารและดินถมซึ่งแตกต่างกันไปตามพื้นที่ด้วย เนื่องจากอิทธิพลจากปัจจัยดังกล่าวจะทำให้ชั้นดินระดับตื้นเกิดการยุบอัดตัว ซึ่งจะเป็นผลหักล้างกับการคืนตัวของชั้นดินระดับลึกและทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับที่ผิวดินไม่เด่นชัดเท่ากับผลจากการคำนวณด้วยทฤษฎี

ตารางที่ 4-3 สรุปการยุบอัดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในอนาคต (พ.ศ. 2551-2570) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดของ 4 สถานีตรวจวัด

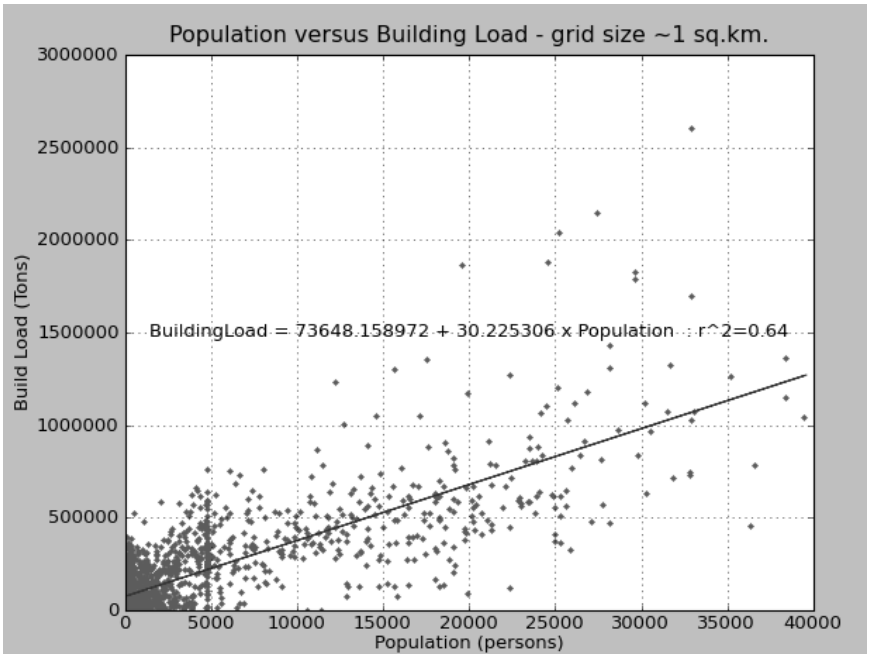
สถานี	กรณีที่	การยุบอัดตัว (%) 0-50 เมตร	การยุบอัดตัว (%) มากกว่า 50 เมตร	การยุบอัดตัว (%) 0-20 เมตร
8	1	89.34	10.66	57.35
	2	90.32	9.67	61.57
	3	90.99	9.01	62.99
20	1	68.65	31.35	22.81
	2	67.72	32.28	24.51
	3	67.98	32.02	26.43
30	1	79.92	20.07	68.95
	2	81.12	18.28	73.77
	3	81.69	18.31	76.04
32	1	63.71	32.29	5.78
	2	69.55	30.45	6.93
	3	73.84	26.16	7.61

4.5 การวิเคราะห์น้ำหนักกดทับจากอาคาร

การคำนวณน้ำหนักกดทับของอาคารได้มีการคิดรวมทั้งน้ำหนักของอาคารและน้ำหนักบรรทุกของอาคาร โดยใช้ค่าเฉลี่ย 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั้น จากนั้นวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของประชากรกับน้ำหนักอาคาร (รูปที่ 4-1) โดยมีการหาสหสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกของอาคารซึ่งถือว่าเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์และความหนาแน่นประชากร ผลการประเมินสหสัมพันธ์ของจำนวนประชากรที่อยู่อาศัยในพื้นที่และน้ำหนักอาคารแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 การกระจายประชากรในพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล



รูปที่ 4-2 การประเมินสหสัมพันธ์

ด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้ภาพรวมของน้ำหนักบรรทุกของอาคารสิ่งปลูกสร้างครอบคลุมพื้นที่ดำเนินการโดยการประมาณการจากจำนวนประชากร LandScan ข้างต้น สำหรับประชากรในปีอดีตและประชากรที่ได้จากทำนายในอนาคต ข้อมูลประชากรนี้ได้จากกรมการปกครองและสำนักงานสถิติแห่งชาติ ที่ปรึกษาได้ทำการปรับสัดส่วนให้สอดคล้องกับข้อมูล LandScan 2005 ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดถูกต้องน่าเชื่อถือมากที่สุด โดยค่าประชากรในกริดของปีที่พิจารณา จากการประมาณการประชากรทั้งในอดีตและอนาคตสามารถใช้ทำนายน้ำหนักบรรทุกทั่วทั้งพื้นที่

ที่ปรึกษาฯได้จัดทำแผนที่น้ำหนักกดทับของอาคาร แผนที่น้ำหนักกดทับของอาคารพัฒนาขึ้นจากแผนที่ผังเมืองของสำนักผังเมืองกรุงเทพมหานครจากการสำรวจปี พ.ศ. 2548 ฐานข้อมูลผังเมืองของสำนักผังเมืองกรุงเทพมหานครครอบคลุมทั้งฝั่งกรุงเทพและธนบุรี แต่อย่างไรก็ตามน้ำหนักอาคารและน้ำหนักบรรทุกอาคารมีปรากฏเฉพาะในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ที่ปรึกษาได้ประมาณการน้ำหนักบรรทุกให้ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดอื่นๆ โดยรอบกรุงเทพมหานคร ในการนี้ที่ปรึกษาใช้ข้อมูลการกระจายตัวประชากร LandScan 2005 ที่แสดงจำนวนประชากรในพื้นที่ กริดทุกๆ 30 ฟิลิปดาx30 ฟิลิปดา มาช่วยในการประมาณการ

5. การพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัว

การพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัวนี้ได้นำข้อมูลในกลุ่มงานด้านการใช้ที่ดิน ด้านสภาพน้ำบาดาล และกลุ่มงานปฐพีกลศาสตร์ มาสร้างแบบจำลองและทำการคำนวณหาการทรุดตัวเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ที่เกิดขึ้นในอดีตและใช้คาดการณ์เหตุการณ์อนาคตที่อาจเกิดขึ้นในกรณีต่างๆ ในพื้นที่ศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 การศึกษาที่ผ่านมา

สถานการณ์การทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี พ.ศ. 2521-2524 บริเวณด้านตะวันออกมีอัตราการทรุดตัวปีละ 10 ซม. ส่วนบริเวณตอนกลางจะอยู่ในช่วงปีละ 5-10 ซม. ภายหลังจากมีมาตรการควบคุมการสูบน้ำในปี พ.ศ. 2526 ระดับน้ำบาดาลเริ่มฟื้นตัวสูงขึ้น อัตราการทรุดตัวในช่วงปี พ.ศ. 2531-2532 ในบริเวณด้านตะวันออกอยู่การทรุดตัวระหว่างปีละ 3-5 ซม. ส่วนบริเวณตอนกลางค่าการทรุดตัวอยู่ระหว่าง 2-3 ซ.ม. นอกจากนั้นในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2532-2533 การทรุดตัวในพื้นที่บริเวณด้านตะวันออกลดลงปีละ 2-3 ซม.และบริเวณตอนกลางจะลดลงเหลือ 1-2 ซม. (Ramnarong and Buapeng, 1992) จากผลการศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ในเรื่อง Soil compression ระหว่างปี พ.ศ. 2521-2524 ในบริเวณชั้นดินลึกไม่เกิน 50 เมตร มีการทรุดตัวร้อยละ 40 ในขณะที่ชั้นดินที่ลึกตั้งแต่ 50-200 เมตรเกิดการทรุดตัวร้อยละ 60

กรุงเทพมหานครตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนที่ยังไม่ผ่านขบวนการอัดตัวแน่น (Normally-consolidated) ดังนั้นการทรุดตัวจึงเกิดขึ้นได้มากกว่าดินที่อัดตัวแน่นแล้ว (Over-consolidated soil) การทรุดตัวของชั้นดินนี้ตามสภาพธรรมชาติโดยที่ไม่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์จะใช้ระยะเวลายาวนานในการยุบอัดตัว แต่เมื่อได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์จะสามารถยุบอัดตัวได้ในอัตราสูง ซึ่งนักปฐพีวิทยามีความเห็นว่าการยุบอัดตัวดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักของการทรุดตัวของชั้นดิน

การอัดตัวของชั้นน้ำซึ่งเป็นสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดิน ผลนี้เกิดจากการอัดตัวของเม็ดดินและช่องว่างระหว่างเม็ดดิน การอัดตัวเป็นผลจากการลดลงของแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลง การลดลงของระดับน้ำใต้ดิน หรือการลดลงของแรงดันน้ำในชั้นน้ำปิดก่อให้เกิดการจัดเรียงของเม็ดดินใหม่ทำให้ใกล้เข้ามามากขึ้นและช่องว่างลดลง ยิ่งมีส่วนผสมของดินเหนียวและช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากเท่าไหร่ ความสามารถในการอัดตัวจะยิ่งสูงขึ้น

3 ปัจจัยหลักสำหรับการอัดตัวของดิน และการทรุดตัวของแผ่นดินที่นักปฐพีวิทยา (soil scientist) ได้ตั้งสมมติฐานไว้ มีดังนี้

1. เกิดจากผลกระทบจากการสูบน้ำ ในชั้นน้ำบาดาล ซึ่งการสูบน้ำบาดาลมีผลทำเกิดการลดต่ำลงของแรงดันน้ำในชั้นดินเหนียว

2. การทรุดตัวอันเนื่องมากจากการน้ำหนักกดทับจากอาคารและสิ่งปลูกสร้างโดยเฉพาะในเขตกลางเมืองกรุงเทพมหานคร ปัจจัยนี้มีผลต่อชั้นดินบริเวณลึกไม่เกิน 50 เมตรแต่อาจมีการกระจายไปในชั้นดินที่ลึกกว่า 50 เมตร สำหรับการคาดการณ์และการควบคุมในเรื่องการทรุดตัวเนื่องมาจากสาเหตุการเติบโตของเมืองอย่างรวดเร็วนี้ทำได้ยากมากเมื่อเทียบกับกรณีแรก โดยเฉพาะการคำนวณการทรุดตัวในชั้นน้ำที่มีสภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกันนั้นเป็นสิ่งที่คาดการณ์ได้ยาก

ผลกระทบที่เกิดจากการทรุดตัวของแผ่นดินปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัด ตัวอย่างเช่น ความเสียหายของอาคารและสิ่งปลูกสร้างสาธารณูปโภค เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลกระทบส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้เกี่ยวข้องกับการบดอัดตัวของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ เนื่องจากฐานรากของอาคารเหล่านี้วางอยู่ในชั้นทรายของชั้นน้ำกรุงเทพนั้นเอง

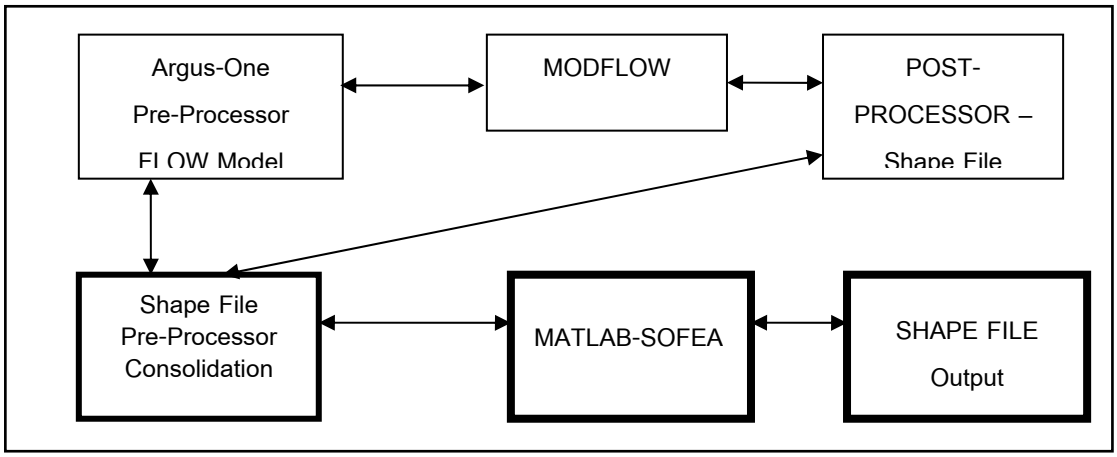
3. ตะกอนจากแม่น้ำ

เมืองที่ตั้งอยู่บนดินตะกอนที่ไม่มีการยุบอัดตัวคายน้ำออกไป (Unconsolidated) ซึ่งประกอบด้วยดินเหนียว ดินทราย และอื่นๆ ซึ่งสามารถยุบตัวได้ โดยเฉพาะบริเวณสันดอนซึ่งแม่น้ำได้เหือดแห้งไป บริเวณลานตะพักลุ่มน้ำ ที่ราบน้ำท่วมถึง ซึ่งกระบวนการบดอัดตัวอย่างธรรมชาติเกิดขึ้น การสร้างเมืองบริเวณนี้ทำให้สถานการณ์ปัญหาด้านการทรุดตัวแย่ลงโดยมีเหตุผลดังนี้

- การก่อสร้างอาคารและถนนเพิ่มมีผลทำให้น้ำกดทับและเกิดการบดอัดในตะกอนเพิ่มขึ้น
- โดยส่วนใหญ่จะมีการดึงน้ำออกทำให้ระดับใต้ดินลดลงนำไปสู่การอัดตัวเนื่องจากแรงดันน้ำ
- มีการนำน้ำบาดาลมาใช้ในการอุปโภคบริโภคและอุตสาหกรรมจึงทำให้เกิดการลดลงของแรงดันน้ำ
- แนวป้องกันน้ำท่วมและเขื่อนที่สร้างขึ้นเพื่อป้องกันน้ำท่วม ได้ตัดทางไหลของน้ำและตะกอนตามธรรมชาติที่มาเพิ่มสะสมบริเวณนี้

5.2 แบบจำลองที่พัฒนา

แบบจำลองในการจำลองสภาพการทรุดตัว ที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้เกิดจากข้อมูลที่รวบรวมได้ภายในพื้นที่ศึกษา โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีของ Terzaghi ด้วยการนำแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน 3 มิติ (MODFLOW) ของชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม Argus-One มาเชื่อมต่อกับโปรแกรม MATLAB โดยใช้โปรแกรม SOFEA โดยตัวประมวลผลก่อน (Pre-processor) ของโปรแกรม Argus-One จะคำนวณแบบจำลองการไหล ในขณะที่ตัวประมวลผลก่อน (Pre-processor) จะแปลงผลลัพธ์ (Output) ที่ถูกส่งออกมาเป็น Shape files ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MapObject ซึ่งสามารถใช้งานได้กับโปรแกรม ArcView ดังแสดงรูปแบบการทำงานในรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 โครงสร้างพื้นฐานในการพัฒนาซอฟแวร์ในการจำลองสภาพการทรุดตัว

1) แบบจำลองแบบแยกส่วน (Compartment model)

แบบจำลองแบบแยกส่วนจะแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 7 ส่วนตามพื้นที่การปกครอง ในแต่ละส่วนจะถูกตั้งสมมติฐานให้มีคุณสมบัติและพฤติกรรมทางอุทกธรณีวิทยาที่คล้ายคลึงกัน รวมถึงการสร้างความสัมพันธ์ของแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน

5.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัว

1) การสร้างแบบจำลองสภาพการอัดตัวและทรุดตัวของแผ่นดิน

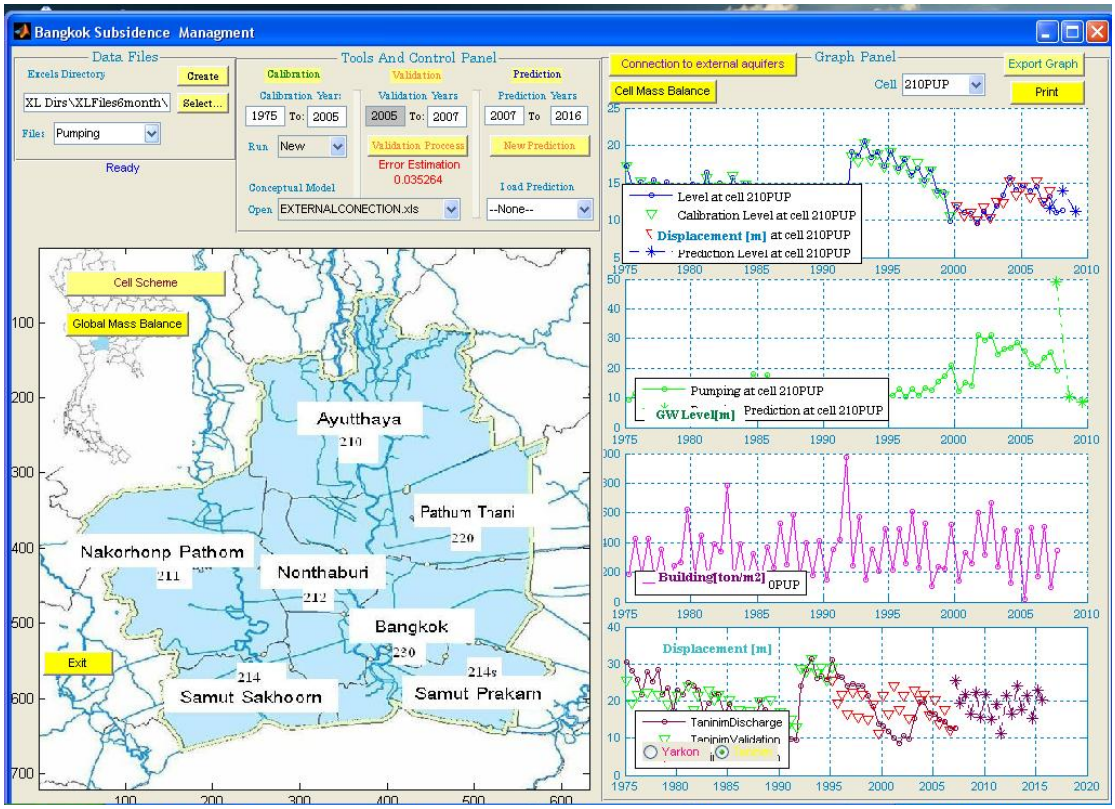
ในการจำลองสภาพการการทรุดตัวของการศึกษานี้ ได้พิจารณาปัจจัยที่ทำให้เกิดการทรุดตัวจาก 3 สาเหตุ ดังนี้

1. การทรุดตัวโดยธรรมชาติ (Natural consolidation) เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของดินในธรรมชาติที่เกิดขึ้นเอง ในบริเวณที่ไม่มีน้ำหนักกดทับและไม่มีการสูบน้ำบาดาล จะมีการทรุดตัวลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นหลัก

2. สาเหตุจากการลดลงของระดับแรงดันน้ำบาดาล เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับหรือแรงดันน้ำที่อยู่ในชั้นน้ำบาดาลจนทำให้เกิดการแกว่งตัวของระดับผิวดิน

3. สาเหตุจากการรับน้ำหนักของดินจากการเจริญเติบโตของเมือง เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักกดทับของอาคารและโครงสร้างผิวดิน ซึ่งเกิดขึ้นจากการพัฒนาของเมืองในแต่ละพื้นที่ ซึ่งทำให้เกิดการทรุดตัวของระดับผิวดิน

ซอฟแวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับจำลองสภาพการทรุดตัวจะทำงานผ่านการแสดงผลแบบแผนที่และรูปภาพดังแสดงในรูปที่ 5-2



รูปที่ 5-2 ลักษณะการแสดงผลการจำลองที่ได้จากซอฟแวร์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้

ผลการพัฒนาแบบจำลองแบบแยกส่วนแบบ Large scale ในระยะนี้ได้ทำการปรับเทียบพารามิเตอร์ทั้งในส่วนเชิงการไหลของน้ำบาดาล (เปรียบเทียบค่าระดับน้ำจากการคำนวณกับจากค่าสังเกตการณ์) และค่าการทรุดตัว ในช่วงปี พ.ศ. 2533-2550 มีผลดังนี้

1) ผลการปรับเทียบระดับน้ำ

การปรับเทียบแบบจำลองได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับน้ำที่คำนวณได้กับค่าระดับน้ำสังเกตการณ์ ผลสรุป คือ

- ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่ามีค่าอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของระดับน้ำสังเกตการณ์
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างระดับน้ำในช่วงปีปรับเทียบมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ของค่าเฉลี่ยโดยส่วนใหญ่ของเซลล์ (Cells)
- ผลการคำนวณระดับน้ำสอดคล้องกับค่าสังเกตการณ์โดยส่วนใหญ่
- ผลการจำลองในบริเวณด้านใต้ของสมุทรสาคร (SSS) และด้านเหนือของสมุทรปราการ (SPN) ต้องมีการปรับปรุงใหม่
- สามารถหาค่าสมดุลน้ำทั้งพื้นที่และสมดุลน้ำในแต่ละเซลได้

2) ผลการปรับเทียบค่าการทรุดตัว

- ผลการปรับเทียบข้อมูลการทรุดตัวสำหรับแต่ละเซลล์ให้ค่าที่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตการณ์
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างการทรุดตัวของการคำนวณและค่าสังเกตการณ์ในช่วงปีปรับเทียบนี้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ของค่าเฉลี่ยโดยส่วนใหญ่ของเซลล์ (Cells)
- ผลการคำนวณระดับน้ำสอดคล้องกับค่าสังเกตการณ์โดยส่วนใหญ่

5.4 ผลการวิเคราะห์สาเหตุแผ่นดินทรุด

1) ผลสรุปการวิเคราะห์ข้อมูลอดีต

การศึกษานี้แบ่งช่วงเวลาในการพิจารณาออกเป็น 4 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 ในปี พ.ศ. 2521-2524 ช่วงที่ 2 ในปี พ.ศ. 2524-2540 ช่วงที่ 3 ในปี พ.ศ. 2540-2546 และ ช่วงที่ 4 ในปี พ.ศ. 2546-2549 ซึ่งการวิเคราะห์จะแยกพิจารณาระหว่างการทรุดตัวในชั้นบนสุดและการทรุดตัวในชั้นน้ำที่ลึก โดยพิจารณาจาก 4 ช่วงเวลาดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของพื้นที่จังหวัดต่างๆ ที่ได้รับอิทธิพลจากการสูบน้ำบาดาลที่มีการเปลี่ยนในช่วงปี พ.ศ. 2521-2549 โดยตารางที่ 5-1 จะแสดงรายละเอียดของผลการวิเคราะห์อิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ สำหรับเหตุการณ์การทรุดตัวในช่วงปี พ.ศ. 2546-2550 ตามพื้นที่ย่อยที่ได้กำหนดไว้

ตารางที่ 5-1 อิทธิพลจากปัจจัยต่างๆสำหรับเหตุการณ์การทรุดตัวในช่วงปี พ.ศ. 2546-2550

พื้นที่	น้ำหนักกดทับจากอาคาร (Building) (%)	การสูบน้ำบาดาล (Water)(%)	ธรรมชาติ (Natural) (%)	การทรุดตัว (Settlement) (ซ.ม./ ปี)
กรุงเทพฯ ตะวันออก	50	50	Negligible	-1.0
กรุงเทพฯ ตะวันตก	55	45	Negligible	-1.1
พระนครศรีอยุทธยา	27	73	Negligible	-0.001
นนทบุรี	18	82	Negligible	-1.2
นครปฐม	2	98	Negligible	-1.5
สมุทรสาคร	24	70	6	-4.0
ปทุมธานี	18	80	2	-0.1
สมุทรปราการใต้	33	60	7	-2.1
สมุทรปราการเหนือ	35	65	Negligible	-1.7

2) ผลการวิเคราะห์เหตุการการทรุดตัวในเหตุการณ์อนาคต

ในเหตุการณ์อนาคตที่ดำเนินการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของแผ่นดินมีปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาหลักๆ 2 ปัจจัยคือ 1) การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและการขยายตัวของการก่อสร้างของอาคารในอนาคตปี พ.ศ. 2551-2570 2) อัตราการสูบน้ำในอนาคตและการบริหารจัดการน้ำบาดาล

สำหรับรูปแบบการสูบน้ำบาดาลและการจัดการน้ำบาดาลในอนาคตมีรูปแบบ 3 กรณีคือ

กรณีที่ 1: การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปาสามารถบริการหรือจ่ายน้ำได้ในพื้นที่ศึกษาในอนาคต ซึ่งพิจารณาถึงการขยายตัวของพื้นที่ให้บริการประปาในอนาคต โดยอัตรากรสูบ 1,386,411 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2570

กรณีที่ 2: การสูบน้ำบาดาลใน กรณีที่ควบคุมการใช้น้ำบาดาลไม่ให้เกินอัตราการสูบ 800,000 ลบ.ม./วัน

กรณีที่ 3: การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปา และพิจารณาโครงการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา (ในอัตรา 500,000 ลบม.ต่อวัน) รวมเป็นอัตราการสูบสุทธิเท่ากับ 886,411 ลบ.ม. /วัน ในปี พ.ศ. 2570

จากผลการวิเคราะห์ตามกรณีต่างๆ สามารถสรุปได้ (ตารางที่ 5-2) ดังนี้

1) ผลการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ 1 และ 2 พบว่ากรณีที่ 2 อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพมหานครลดลงเหลือปีละ 0.4 ซม.
2) ยิ่งไปกว่านั้นอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินเพิ่มขึ้นในจังหวัดนนทบุรี สมุทรสาครและสมุทรปราการในกรณีที่ 2 เนื่องจากการกระจายตัวของการสูบน้ำบาดาล
3) ในกรณีที่ 3 ผลเป็นที่น่าสนใจคือค่าอัตราการทรุดตัวมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ 2 ในบริเวณกรุงเทพมหานคร และในบริเวณจังหวัดนนทบุรี สมุทรสาครและสมุทรปราการจะมีค่าที่หรือน้อยกว่า

ตารางที่ 5-2 ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดในพื้นทีย่อยต่าง ๆ ตามกรณีทั้ง 3

พื้นที่	**กรณีที่ 1 (ซ.ม./ ปี)**	**กรณีที่ 2 (ซ.ม./ ปี)**	**กรณีที่ 3 (ซ.ม./ ปี)**
กรุงเทพฯ ตะวันออก	-0.8	-0.4	-0.4
กรุงเทพฯ ตะวันตก	-0.9	-0.5	-0.4
พระนครศรีอยุธยา	-0.001	-0.001	-0.001
นนทบุรี	-1.0	-0.9	-0.8
นครปฐม	-1.3	-1.2	-1.1
สมุทรสาคร	-2.0	-1.8	-1.8
ปทุมธานี	-0.1	-0.1	-0.1
สมุทรปราการใต้	-1.8	-1.6	-1.6
สมุทรปราการเหนือ	-1.7	-1.2	-1.1
เฉลี่ย	-1.07	-0.86	-0.81

5.5 สรุปผลการศึกษา

1) สรุปผลการพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัว

ในการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีข้อสรุปดังนี้

1) ได้ปรับเทียบแบบจำลองสามมิติที่พัฒนาขึ้นสำหรับการคำนวณค่าการทรุดตัวในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลในชั้นน้ำ 9 ชั้นน้ำเรียบร้อยแล้ว

2) ได้ปรับเทียบโปรแกรมระบบกริด 2 ระบบคือแบบกริดหยาบและแบบ

กริดละเอียด โดยใช้ข้อมูลค่าการทรุดตัวของแผ่นดินในแต่ละสถานีทั้ง 36 สถานีมาปรับเทียบ

3) โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานในการคำนวณเชิงปริมาณ ดังนี้

3.1) ค่าการทรุดตัวสะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 ที่บริเวณศูนย์กลางของแต่ละเซลการคำนวณและการคำนวณค่าการทรุดตัวเชิงพื้นที่จะคิดจากจุดศูนย์กลางของแต่ละชั้นน้ำ

3.2) การเปรียบเทียบอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ จะเปรียบเทียบกับผลการทรุดตัวจากปัจจัยดังกล่าวคือ

- การทรุดตัวตามธรรมชาติ (Natural consolidation) ที่เกิดจากน้ำหนักของดินตะกอน
- น้ำหนักอาคาร/ดินถมกดทับ
- การสูบน้ำบาดาล

4) โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ผู้ใช้งานจะคุ้นเคยและใช้งานได้ง่าย โดยผู้ใช้งานเพียงเลือกกรณีการสูบน้ำแบบต่างๆ และชุดของข้อมูลพารามิเตอร์ได้ สำหรับการใช้งานในพื้นที่อื่นนั้นจะต้องมีการรวบรวมข้อมูลดังที่กล่าวในข้อ 2)

5) ได้จัดอบรมการใช้งานโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแก่เจ้าหน้าที่กรมทรัพยากรน้ำบาดาลเป็นเวลา 8 วัน

6) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเหตุการณ์ทรุดตัวในอดีตด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงผลได้เป็นอย่างดี

7) สามารถวิเคราะห์การทรุดตัวของแผ่นดินกรณีเหตุการณ์อนาคต 3 กรณีได้

สรุปได้ว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณค่าการทรุดดังกรณีดังที่กล่าวมาโดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวทั้ง 36 สถานี เนื่องจากข้อมูลที่ใช้เพื่อการพัฒนานี้เป็นสิ่งที่หามายาก ผลคุณภาพของผลที่ได้จากการคำนวณนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลที่ได้มา

2) สาเหตุของการทรุดตัวและแนวโน้ม

การประยุกต์ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุของการทรุดตัวของแผ่นดินที่ผ่านมาว่า มาจาก 1) การสูบน้ำบาดาล 2) น้ำหนักอาคารดินถมที่กดทับ และ3) การ

ทรุดตามธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 69:29:2 ตามลำดับ โดยแยกอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ สำหรับเหตุการณ์การทรุดตัวในช่วงปี พ.ศ. 2546-2550 ตามพื้นที่ สรุปได้ดังนี้

- พื้นที่กรุงเทพฯ ตะวันออก (BE) เกิดการทรุดตัว 1.0 เซนติเมตร/ปี โดยเกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและจากน้ำหนักอาคารที่กดทับร้อยละ 50 เช่นเดียวกัน
- พื้นที่กรุงเทพฯ ตะวันตก (BW) เกิดการทรุดตัว 1.1 เซนติเมตรต่อปี โดยเกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและจากน้ำหนักอาคารที่กดทับร้อยละ 45 และ 55 ตามลำดับ
- พื้นที่ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (PNS) เกิดการทรุดตัว 0.001 เซนติเมตรต่อปี โดยเกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและจากน้ำหนักอาคารที่กดทับร้อยละ 73 และ 27 ตามลำดับ
- พื้นที่จังหวัดนนทบุรี (NT) เกิดการทรุดตัว 1.2 เซนติเมตรต่อปี โดยเกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและจากน้ำหนักอาคารที่กดทับร้อยละ 82 และ 18 ตามลำดับ
- พื้นที่ จังหวัดนครปฐม (NP) เกิดการทรุดตัว 1.2 เซนติเมตรต่อปี โดยเกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและจากน้ำหนักอาคารที่กดทับร้อยละ 98 และ 2 ตามลำดับ
- พื้นที่ จังหวัดสมุทรสาคร (SSS) เกิดการทรุดตัว 4 เซนติเมตรต่อปี โดยร้อยละ 70 เกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและร้อยละ 24 และ 6 เกิดจากน้ำหนักอาคารที่กดทับ และการทรุดตัวตามธรรมชาติ ตามลำดับ
- พื้นที่ จังหวัดปทุมธานี (PT) เกิดการทรุดตัว 0.1 เซนติเมตรต่อปี โดยร้อยละ 80 เกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและร้อยละ 18 และ 2 เกิดจากน้ำหนักอาคารที่กดทับ และการทรุดตัวตามธรรมชาติ ตามลำดับ
- พื้นที่ จังหวัดสมุทรปราการใต้ (SPS) เกิดการทรุดตัว 2.1 เซนติเมตรต่อปี โดยร้อยละ 60 เกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและร้อยละ 33 และ 7 เกิดจากน้ำหนักอาคารที่กดทับ และการทรุดตัวตามธรรมชาติ ตามลำดับ
- พื้นที่ จังหวัดสมุทรปราการเหนือ (SPN) เกิดการทรุดตัว 1.7 เซนติเมตรต่อปี โดยเกิดจากอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลและจากน้ำหนักอาคารที่กดทับร้อยละ 65 และ 35 ตามลำดับ

ในอนาคตอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลจะยังคงมีผลต่ออัตราการทรุดตัวในที่นี้จะใช้ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ย่อยโดยมีผลสรุปดังนี้ ถ้าอัตราการสูบน้ำบาดาลจะเพิ่มไปเป็น 1,386,411 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในปี พ.ศ. 2570 การทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.07 เซนติเมตรต่อปี และถ้ามีการควบคุมการสูบที่ 800,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน การทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 0.86 เซนติเมตรต่อปี กรณีมีการเติมน้ำบาดาลการทรุดตัวในพื้นที่เติมน้ำบาดาลเฉลี่ยจะคงตัว ในขณะที่พื้นที่นอกเขตเติมน้ำบาดาลมีค่าเท่ากับ 0.81 เซนติเมตรต่อปี

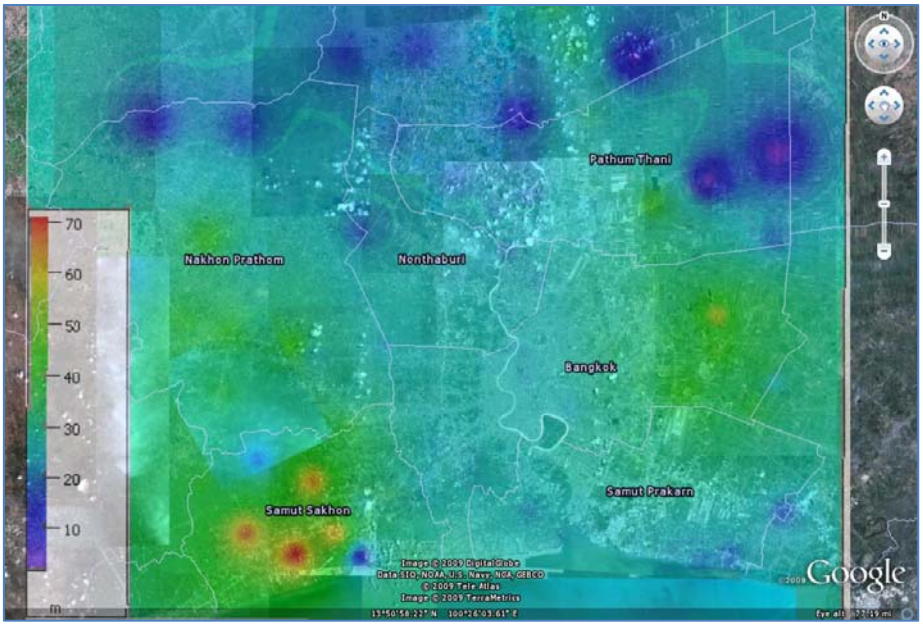
6. การศึกษาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ในการศึกษาคณะที่ปรึกษาใช้ระบบภูมิสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมโยงระหว่างกลุ่มงานต่างๆ และใช้ระบบภูมิสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นเครื่องมือในการจัดเก็บข้อมูลด้านต่างๆ อย่างเป็นระบบแผนที่ทั้งหมดทั้งชนิดที่เป็นข้อมูลฟีเจอร์ (เวกเตอร์) และชนิดที่เป็นข้อมูลกริด การจัดเก็บกำหนดให้เป็น ESRI Shapefile และ GeoTIFF เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้ใช้งานกับซอฟต์แวร์ประยุกต์ GIS Desktop แผนที่ทั้งหมดอ้างอิงอยู่ระบบพิกัดบนพื้นหลักฐานแผนที่ WGS-84 สามารถแสดงในรูปแบบการฉายแผนที่พิกัดฉากยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator: UTM) และรูปแบบการฉายแบบพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic Coordinate System) ได้

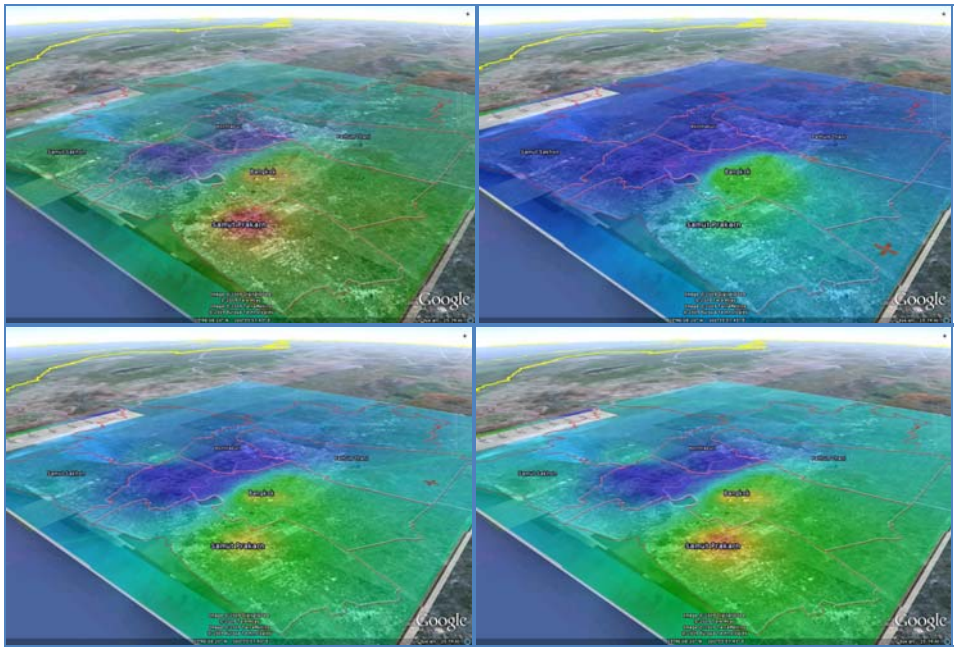
คณะที่ปรึกษาใช้แผนที่ภาพดาวเทียม Global Land Survey (GLS) ความละเอียดจุดภาพ 30 เมตรเพื่อติดตามการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุม การวิเคราะห์การขยายตัวของเมือง เพื่อหาสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินทรุด แผนที่ภาพดาวเทียมชุด GLS แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมในห้วงปี พ.ศ. 2533 2543 และ 2548 โดยได้จัดทำให้อยู่รูปแบบแบบของภาพสีผสม (Color composite)

แผนที่ระดับน้ำบาดาล พัฒนาขึ้นจากข้อมูลค่าระดับจากการสังเกตบ่อน้ำบาดาลที่รวบรวมได้ ในโครงการได้มีรวบรวมข้อมูลจากการสังเกตุระดับน้ำบาดาลทั้ง 8 ชั้นน้ำบาดาลครอบคลุมการสังเกต จากปี พ.ศ. 2521 – 2550 ของสำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล นอกจากนั้นยังได้มีการสร้างแบบจำลองและมีการทำนายแบบจำลองน้ำบาดาลในพื้นที่โครงการครอบคลุมห้วงเวลา 50 ปี จาก พ.ศ. 2520-2570 ข้อมูลทั้งหมดถูกจัดทำให้เป็นข้อมูลกริดเช่นเดียวกัน ในภาพแสดงข้อมูลกริดของระดับน้ำบาดาลที่นำไปแสดงซ้อนบน Google Earth ดังรูปที่ 6-1

ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของแผ่นดินได้รวบรวมข้อมูลค่าระดับ จากปี พ.ศ. 2521-2549 ตามที่ปรากฏใน รายงานผลการสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินภายใต้ โครงการสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล กรมแผนที่ทหาร หมุดตรวจสอบแผ่นดินทรุดที่ใช้การวิเคราะห์การทรุดตัวมีทั้งสิ้น 40 หมุด มีการวิเคราะห์การทรุดตัวในสำหรับแต่ละหมุด และมีการวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวรูปแบบภาพ ผลลัพธ์การทรุดตัวเป็นแผนที่แสดงการทรุดตัวสะสม ข้อมูลค่าระดับและการประมาณค่าการทรุดให้เป็นแผนที่กริด ระยะห่างกริดเป็น 500 x 500 ตารางเมตร การคำนวนการทรุดตัวเป็นรายปีสามารถแสดงเป็นรูปแบบแอนิเมชั่นได้ ดังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-1 แผนที่กริดระดับน้ำบาดาลซ้อนทับบน Google Earth



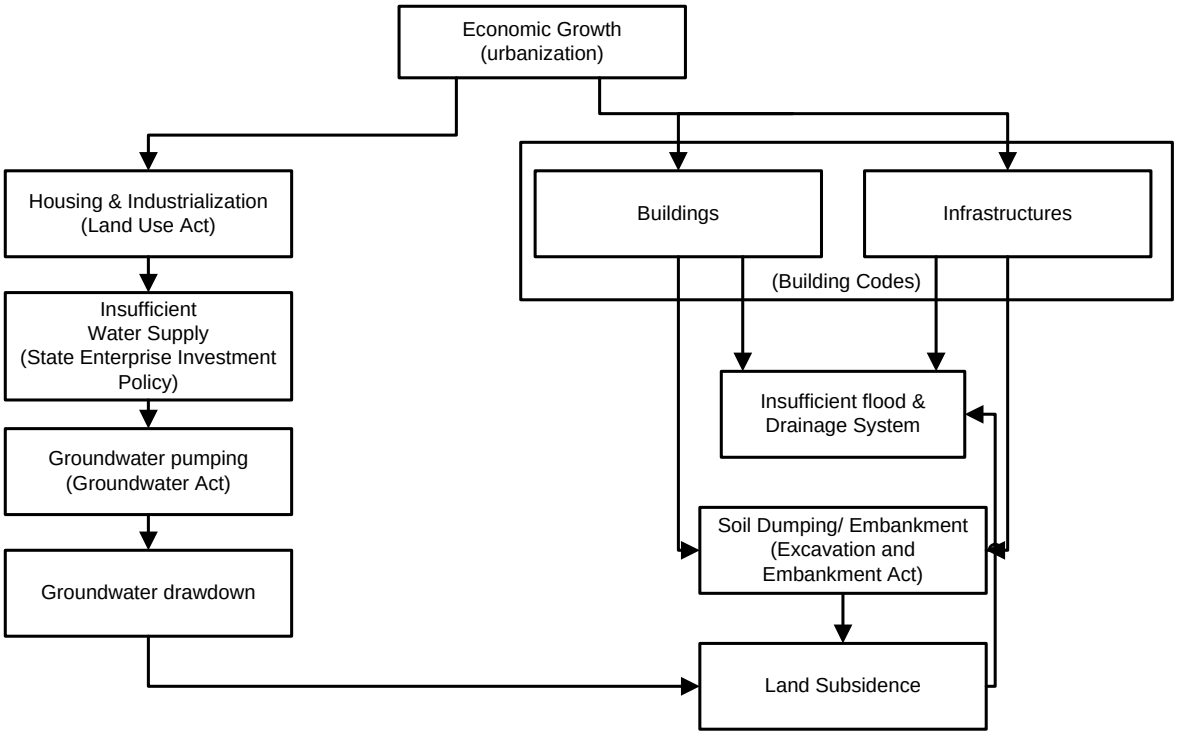
รูปที่ 6-2 ตัวอย่างภาพแอนนิเมชั่นเพื่อให้นำไปใช้วิเคราะห์

7. การจัดทำข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาวิเคราะห์สาเหตุปัญหาแผ่นดินทรุดจากการศึกษาครั้งนี้ซึ่งได้จากการวิเคราะห์สภาพการใช้ที่ดิน การวิเคราะห์ผลการวัดและการจำลองสภาพน้ำบาดาล การวิเคราะห์จากข้อมูลการวัดที่สถานี การวิเคราะห์จากแบบจำลองการทรุดตัวที่ใช้ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ และการแสดงผลผ่านระบบแผนที่ พบว่า การทรุดตัวมีสาเหตุทั่วไป และสาเหตุตามลักษณะของดินในพื้นที่ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงตามสภาพธรรมชาติ แต่จากตัวเลขการตรวจวัดที่มี สาเหตุหลักของการทรุดตัวเกิดจากการลดลงของระดับน้ำบาดาล โดยมีผลจากการพัฒนาเมือง (เช่น ตัวอาคารและการถมที่) เป็นปัจจัยเสริม และการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวของดินเองตามธรรมชาติ (ซึ่งจากผลการทบทวนการศึกษายังอยู่ในอัตราน้อยมากเมื่อเทียบกับสาเหตุหลัก) นอกนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่อาจมีส่วนเช่น การบดอัดดินที่ไม่แน่นพอ การกระแทกจากการเคลื่อนไหวต่างๆ แต่ก็ยังเป็นปัจจัยประกอบเมื่อพิจารณาจากปัญหาแผ่นดินทรุดโดยภาพรวม วงจรการเกิดแผ่นดินทรุดเกิดจากการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคมของพื้นที่ก่อให้เกิดความต้องการใช้น้ำ เมื่อเขตบริการของการประปาเติบโตไม่ทัน ผู้ใช้น้ำจึงหันไปใช้แหล่งน้ำบาดาลจนทำให้เกิดการลดตัวลงของระดับน้ำบาดาล และเนื่องจากสภาพดินในพื้นที่นี้ โดยเฉพาะดินชั้นบนเป็นดินอ่อน ทำให้เกิดการทรุดตัวของดิน เนื่องจากการคายของน้ำออกจากชั้นดิน นอกจากนี้การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมยังทำให้เกิดความจำเป็นในการก่อสร้างทั้งอาคาร ที่อยู่อาศัย และอุตสาหกรรม และเนื่องจากพื้นที่นี้เป็นพื้นที่เสี่ยงต่อภาวะน้ำท่วมมาแต่อดีต การก่อสร้างจึงต้องทำการถมที่ให้สูงในระดับที่กันน้ำท่วมได้ จึงทำให้เกิดน้ำหนักทับเพิ่มมากขึ้นในพื้นที่เมือง ทำให้ภาวการณ์ทรุดตัวเพิ่มมากขึ้น (ดังรูปที่ 7-1) (ทำให้มีการป้องกันน้ำท่วมโดยการถมที่ที่สูงขึ้น เพื่อป้องกันน้ำท่วมอีก)

ในการแก้ไขปัญหาแผ่นดินทรุดในพื้นที่นี้ ปัจจัยหลักจึงเป็นการควบคุมการสูบน้ำให้ระดับน้ำบาดาลอยู่ในระดับที่ทำให้อัตราการทรุดตัวของดินอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ก่อน ซึ่งจะทำได้ก็ต้องมีการบริหารการเจริญเติบโต (โดยใช้ พรบ. ผังเมืองเข้าช่วย) ให้สมดุลกับการขยายตัวของการประปา(โดยใช้กลไกการดูแลการลงทุนรัฐวิสาหกิจ) และการใช้น้ำบาดาล(โดยใช้ พรบ.น้ำบาดาล) นอกจากนี้ ถ้าสามารถปรับปรุงระบบการป้องกันน้ำท่วมและการระบายน้ำจนมีความมั่นใจได้แล้ว ก็สามารถกำหนดระดับของสาธารณูปโภค เช่น ถนน ได้ ซึ่งจะส่งผลให้การถมพื้นที่อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้

อย่างไรก็ตาม หลังมีมาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาลในปี พ.ศ. 2546 และมีการลงทุนขยายเขตประปา ส่งผลให้การใช้น้ำบาดาลในพื้นที่ลดลง ระดับน้ำปรับตัวสูงขึ้น การทรุดตัวอยู่ในอัตราที่ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นสภาพความสามารถในการปรับตัวของภาคเอกชน และการจัดการของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 7-1 วงจรสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดิน

อย่างไรก็ตาม ประเด็นเรื่องการทรุดตัวของแผ่นดินที่ผ่านมา ก็ควรเป็นบทเรียนเพื่อมิให้เกิดสภาพปัญหาดังกล่าวขึ้นอีก โดยเฉพาะในพื้นที่พัฒนาใหม่ ทางโครงการจึงมีข้อเสนอแนะและมาตรการต่างๆ เพื่อติดตามแก้ไขปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยมาตรการด้านต่างๆ ดังนี้

1) มาตรการด้านน้ำบาดาล

- ควบคุมการสูบใช้น้ำบาดาลให้อยู่ในระดับควบคุม (-20 ถึง – 30 เมตรจากผิวดิน หรืออัตราการสูบรวมประมาณ 800,000 ลบมต่อวัน) จะได้ค่าอัตราการทรุดเฉลี่ยต่ำกว่า1 ซมต่อปี (อันเป็นอัตราการทรุดตัวที่ยอมรับได้) โดยใช้มาตรการผสมประสานทั้งด้านราคา ด้านบริหาร และด้านผู้ใช้

- ติดตามการปรับตัวของระดับน้ำบาดาลและการทรุดตัวและการคืนตัวของระดับดินเป็นระยะเพื่อดูผลการคืนตัวและผลกระทบที่อาจมีต่อโครงสร้างและอาคารที่มีอยู่

2) มาตรการด้านผังเมือง

- จัดทำผังเมืองให้มีการเจริญเติบโตของเมืองให้ไปในแนวทางก่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการใช้ทรัพยากรและความต้องการ (โดยเฉพาะด้านน้ำ)

- ให้มีศึกษาการควบคุมระดับการถมดินในโครงการสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ ในพื้นที่ที่มีระบบการป้องกันน้ำท่วมและระบายน้ำดีแล้ว

3) มาตรการด้านการลงทุน

สนับสนุน การประปาให้มีการขยายเขตบริการให้ทันต่อการขยายตัวของเมือง

ตารางที่ 7-1 มาตรการเชิงรุกสำหรับการทรุดตัวของแผ่นดิน

การควบคุมการใช้ที่ดิน	การบริหารการเติบโต	เพื่อควบคุมการทรุดตัว
การขยายเขตประปา	การขยายเขตบริการและแหล่งน้ำดิบ	
การควบคุมน้ำบาดาล	การควบคุมการสูบน้ำบาดาลภายใต้ภายใต้ระดับน้ำควบคุม	
การปรับปรุงระบบป้องกันน้ำท่วมและระบายน้ำ	การกำหนดระดับน้ำท่วม	
การควบคุมการถมที่	การควบคุมการถมที่ (พื้นที่/ ความสูง)	

8. สรุปผลการศึกษา

8.1 สรุปผลการศึกษา

1) การศึกษาสภาพการใช้ที่ดิน

การศึกษาสภาพการใช้ที่ดิน เป็นการศึกษาถึงความเป็นเมืองและการเจริญเติบโตของเมือง (Urbanization) ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลอันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักอาคาร (Load of building) องค์ประกอบในการศึกษาความเป็นเมือง แบ่งออกเป็น 4 ประการ ได้แก่ การศึกษาในเรื่องของประชากรเมืองและการเปลี่ยนแปลง การใช้ประโยชน์ที่ดิน ประเภทอาคาร (Building types) และสาธารณูปโภคพื้นฐาน (Infrastructure) โดยศึกษาในระดับมหภาค คือ พิจารณาในเขตเทศบาลที่เป็นปริมณฑลของกรุงเทพฯ และเขตกรุงเทพมหานคร และระดับจุลภาค คือ การใช้ที่ดินของพื้นที่โดยรอบหลักหมุดวัดแผ่นดินทรุด ใน 4 พื้นที่ตัวอย่าง ได้แก่ (1) พื้นที่โดยรอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร (2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (3) วัดบางพลีใหญ่ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ และ (4) ศาลากลางจังหวัดสมุทรสาคร ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

1) ลักษณะการขยายตัวของเมืองที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาสภาพทางกายภาพของเมือง พบว่า มีการกระจายตัวของพื้นที่เมืองไปในพื้นที่ว่างและพื้นที่เกษตรกรรมในเกือบทุกพื้นที่ส่วนขยายของกรุงเทพมหานคร

2) จากการศึกษาในเรื่องสภาพการใช้ที่ดินของพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลที่ผ่านมา ซึ่งประกอบด้วยการพัฒนาของภูมิภาค การใช้ประโยชน์ที่ดิน การขยายตัวทั้งในอดีต ปัจจุบัน และอนาคต จะเห็นได้ว่ากรุงเทพฯและปริมณฑลมีระดับความเป็นเมืองสูง (High urbanization)

ข้อมูลและการวิเคราะห์ทั้งในระดับมหภาค (การศึกษากรุงเทพฯและปริมณฑล) และจุลภาค (การสำรวจ 4 พื้นที่) ได้นำมาเป็นข้อมูลฐาน (Base information) ของการกำหนดน้ำหนักอาคาร นอกจากนี้แล้วผลการศึกษาเมื่อบูรณาการกับด้านอื่นๆ แล้ว ทำให้ทราบถึงลักษณะความเป็นเมืองและการเติบโตของเมืองทั้งในเชิงกายภาพและประชากร ปัญหาของเมือง การผังเมืองของประเทศไทย รวมถึงประเด็นหลัก คือ ความสัมพันธ์ของความเป็นเมืองกับการทรุดตัวของแผ่นดิน ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำให้เกิดข้อเสนอแนะมาตรการทางผังเมือง ซึ่งเป็นมาตรการสำคัญประการหนึ่งในการแก้และป้องกันปัญหาหลักจากการตระหนักรู้ถึงสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

2) การศึกษาสภาพน้ำบาดาล

การพิจารณาระดับน้ำบาดาล และการทรุดตัวของแผ่นดินตามตำแหน่งของสถานีวัดการทรุดตัวของแผ่นดินจำนวน 36 สถานี จากปี พ.ศ. 2521-2550 พบว่า สภาพน้ำบาดาลและการทรุดตัวจากลักษณะดังกล่าวสามารถแบ่งพื้นที่ออกได้เป็น 3 เขต (Zone) สามารถสรุปได้ดังนี้

- เขตที่ 1 พื้นที่มีระดับน้ำบาดาลสูงขึ้น อัตราการทรุดตัวลดลง และระดับน้ำมีผลต่ออัตราการทรุดตัวภายใน 3 ปี โดยพื้นที่ในเขตดังกล่าว ได้แก่ กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ นนทบุรี (อ. บางกรวย อ. ปากเกร็ด อ. เมืองนนทบุรี) ปทุมธานี (ติดกรุงเทพ) นครปฐม (อ. พุทธมณฑล) และสมุทรสาคร (เมืองสมุทรสาคร) ปทุมธานี (อ. คลองหลวง อ. ธัญบุรี)
- เขตที่ 2 พื้นที่มีระดับน้ำบาดาลคงที่ อัตราทรุดตัวคงที่ หรือสูงขึ้น และระดับน้ำมีผลต่ออัตราการทรุดตัวตั้งแต่ 3 ปี หรือไม่มีความสัมพันธ์ โดยพื้นที่ในเขตดังกล่าว ได้แก่ จังหวัดนครปฐม (อ. บางเลน อ. ดอนตูม อ. นครชัยศรี) สมุทรสาคร (อ. บ้านแพ้ว) และนนทบุรี (อ. ไทรน้อย)
- เขตที่ 3 พื้นที่ระดับน้ำคงที่ หรือลดลง อัตราทรุดตัวคงที่ หรือสูงขึ้น และไม่มีความสัมพันธ์ โดยพื้นที่ดังกล่าว ได้แก่ จังหวัดปทุมธานี (อ. ลำลูกกา)

การศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินช่วงเวลาในอดีต เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระดับน้ำบาดาลและการทรุดตัวของแผ่นดิน จึงจำลองสภาพระดับน้ำบาดาลในอนาคต 20 ปีข้างหน้า จากปี พ.ศ. 2551-2570 โดยจำลองสภาพเหตุการณ์ออกเป็น 3 กรณีคือ

- กรณีที่ 1 การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปาสามารถบริการหรือจ่ายน้ำได้ในพื้นที่ศึกษาในอนาคต ซึ่งพิจารณาถึงการขยายตัวของพื้นที่ให้บริการประปาในอนาคตด้วยอัตราการสูบ 1,386,411 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2570
- กรณีที่ 2 การสูบน้ำบาดาลในกรณีที่ควบคุมการใช้น้ำบาดาลไม่ให้เกินอัตราการสูบ 800,000 ลบ.ม./วัน
- กรณีที่ 3 การสูบน้ำบาดาลที่เกิดจากความต้องการใช้น้ำส่วนเกินจากที่ประปาและพิจารณาโครงการเติมน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา (ในอัตรา 500,000 ลบ.ม. ต่อวัน) รวมเป็นอัตราการสูบสุทธิเท่ากับ 886,411 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2570

ผลการพิจารณาการใช้น้ำในอนาคตทั้ง 3 กรณีดังกล่าวข้างต้น ปริมาณการใช้น้ำในกรณีที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้ระดับของน้ำบาดาลได้รับผลกระทบในระยะยาวมีแนวโน้มโดยมีค่าลดต่ำลงมากขึ้นใน 3 ชั้นน้ำหลัก รองลงมาเป็นกรณีที่ 3 และกรณีที่ 2 ตามลำดับ

3) การทบทวนข้อมูลและการวิเคราะห์สภาพแผ่นดินทรุด

จากผลการตรวจวัดที่รวบรวมได้พบว่าการทรุดตัวของผิวดินส่วนใหญ่ในปัจจุบันมีค่าประมาณ 0 – 2 ซม./ปี โดยพื้นที่ที่ยังคงมีการทรุดตัวด้วยอัตราที่มากกว่า 2 ซม./ปี ได้แก่ สถานีตรวจวัดบริเวณมหาวิยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี องค์การบริหารส่วนจังหวัดสมุทรสาคร และศาลากลางจังหวัดปทุมธานี นอกจากนี้ยังพบว่ามีแผ่นดินมีการคืนตัวหรือมีระดับที่สูงขึ้นเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 ซม./ปี) ในบางพื้นที่เช่น สถานีตรวจวัดบริเวณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางกรวย) กองบินตำรวจ (รามอินทรา) กรมชลประทาน (ปากเกร็ด) คลังพัสดุการเคหะฯ (คลองจั่น) ศาลากลางจังหวัดนนทบุรี วัดไทรใหญ่ (จ. นนทบุรี) และ วัดเทียนถวาย (ปากคลองรังสิต) เนื่องจากระดับแรงดันน้ำมีระดับที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาการยุบอัดตัวในระดับความลึกต่างๆ พบว่าเริ่มมีการคืนตัวในชั้นดินระดับลึกตั้งแต่ 20 เมตรลงไปด้วยอัตราการคืนตัวปานกลาง (1 - 2 ซม/ปี) อย่างไรก็ตามการยุบอัดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งอยู่ในระดับตื้นก็มีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ผลจากการคืนตัวของชั้นดินในระดับลึกไม่เด่นชัด

ผลการศึกษาพบว่าการยุบอัดตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนระดับตื้น โดยมีสัดส่วนถึง 93.69% ในบริเวณสถานีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและมีสัดส่วนลดลงเหลือประมาณ 74.79% ที่สถานีศาลากลางจังหวัดสมุทรสาคร จากการคำนวณพบว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดได้ แต่เมื่อเพิ่มปัจจัยเนื่องจากน้ำหนักดินถมและน้ำหนักที่เกิดจากอาคารในบริเวณใกล้เคียงแล้วสามารถคำนวณการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้เป็นอย่างดี โดยสถานีตรวจวัดที่ได้รับผลกระทบจากน้ำหนักดินถมและน้ำหนักอาคารได้แก่ สถานีตรวจวัดจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสถานีตรวจวัดสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อรวมอิทธิพลเนื่องจากน้ำหนักดินถม น้ำหนักอาคารและจากการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันน้ำเข้าด้วยกันแล้ว พบว่าการยุบอัดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนมีสัดส่วนประมาณ 85.36% ถึง 93.69% ของการทรุดตัวรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้น

4) การพัฒนาแบบจำลองการทรุดตัว

การศึกษาครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระดับน้ำ ข้อมูลทรุดตัวที่เกิดขึ้นในอดีต มาทำการพัฒนาเป็นแบบจำลองการทรุดตัว ซึ่งจะแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วน และหาความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับปัจจัยอื่น (คือ ค่าความดันน้ำ น้ำหนักอาคาร/ดินถม การทรุดตัวตามธรรมชาติ (คำนวณจากน้ำหนักตะกอนแม่น้ำ) โดยมีแบบจำลองน้ำใต้ดิน แบบจำลองการทรุดตัว และโปรแกรมเชื่อมโยง

เพื่อใช้จำลองสภาพต่างๆ ในเงื่อนไขอื่นที่จะเปลี่ยนแปลงในอนาคตได้ การปรับเทียบค่าคำนวณใช้ค่าการทรุดตัวที่วัดได้เฉลี่ยของพื้นที่ที่มีการแบ่ง แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ได้แก่ แบบจำลอง 3 มิติในพื้นที่ศึกษา และแบบจำลองแบบแยกส่วน (Compartment model)

ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองการทรุดตัวที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ปรับเทียบจากค่าเฉลี่ยตามพื้นที่ สามารถจำแนกหาสาเหตุของการทรุดตัวของแผ่นดินที่ผ่านมา พบว่าสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาล น้ำหนักอาคารรวมดินถม และการทรุดตามธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 69:29:2 ตามลำดับ ในอนาคตอิทธิพลของการสูบน้ำบาดาลจะยังคงมีผลต่ออัตราการทรุดตัวในที่นี้จะใช้ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ย่อยโดยมีผลสรุปดังนี้ ถ้าอัตราการสูบน้ำบาดาลจะเพิ่มไปเป็น 1,386,411 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในปี พ.ศ. 2570 การทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.07 เซนติเมตรต่อปี และถ้ามีการควบคุมการสูบที่ 800,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน การทรุดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 0.86 เซนติเมตรต่อปี กรณีมีการเติมน้ำบาดาลการทรุดตัวในพื้นที่เติมน้ำบาดาลเฉลี่ยจะคงตัว ในขณะที่พื้นที่นอกเขตเติมน้ำบาดาลมีค่าเท่ากับ 0.81 เซนติเมตรต่อปี

5) การจัดทำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในโครงการ

ในการศึกษาคณะที่ปรึกษาใช้ระบบภูมิสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมโยงระหว่างกลุ่มงานต่างๆ

5.1) แผนที่ทางธรณีวิทยา

แผนที่ธรณีวิทยาที่ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลถูกจัดทำขึ้นในมาตราส่วน 1:50,000 ถึง 1:250,000

5.2) แผนที่ระดับน้ำบาดาล

แผนที่ระดับน้ำบาดาล พัฒนาขึ้นจากข้อมูลค่าระดับจากการสังเกตบ่อน้ำบาดาลที่รวบรวมได้ โดยรวบรวมข้อมูลจากการสังเกตระดับน้ำบาดาลทั้ง 8 ชั้นน้ำบาดาล ข้อมูลดังกล่าวได้จากค่าระดับน้ำบาดาล จากปี พ.ศ. 2521 – 2550 นอกจากนั้นยังได้มีการจำลองแบบข้อมูลน้ำบาดาล 50 ปี จากปี พ.ศ. 2520-2570

8.2 ข้อเสนอแนะ

การจัดทำข้อเสนอแนะในโครงการหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวของแผ่นดินต่อไปในอนาคต ได้มีการทบทวนมาตรการต่างๆ ที่กรมทรัพยากรน้ำบาดาลและหน่วยงานอื่นที่ดำเนินการ อาทิเช่น การกำหนด พรบ. บัญญัติน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2520 และการปรับปรุง พรบ. การออกกฎกระทรวงและ

ระเบียบ การกำหนดเขตวิกฤต การจัดเก็บค่าน้ำ การสร้างเครือข่ายบ่อสังเกตการณ์ การจัดหาแหล่งน้ำผิวดินเสริมพร้อมขยายเขตบริการประปา ตามมติครม. ปี พ.ศ. 2546 ผลการดำเนินดังกล่าว ส่งผลให้ระดับน้ำบาลในพื้นที่ และการทรุดตัวมีสภาพที่ดีขึ้น และมีการศึกษาเสนอให้ปรับค่าอนุรักษ์ลงตามสภาพที่ดีขึ้น จากผลการวิเคราะห์สาเหตุของแผ่นดินทรุดที่ผ่านมา ถึงแม้การทรุดตัวจะมาจากหลายปัจจัยและมีลักษณะที่เกิดทั้งในภาพรวมและตามลักษณะพื้นที่ แต่ปัจจัยหลักจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ความดันจากระดับน้ำบาดาลที่ลดลงในอดีต ส่งผลให้เกิดการทรุดตัว เป็นหลัก โดยมีน้ำหนักจากการถมที่และอาคารเป็นปัจจัยเสริม การทรุดตัวในหลายพื้นที่ยังอยู่ในสภาพที่ยังไม่สมดุล ยังมีความจำเป็นต้องมีมาตรการเฝ้าระวังต่อสภาพปัญหาแผ่นดินทรุดดังกล่าวต่อไป

มาตรการที่เสนอในการป้องกันสภาพแผ่นดินทรุดคือ ต้องมีระบบในการติดตามและเฝ้าระวังทั้งด้านระดับน้ำ และแผ่นดินทรุดอย่างต่อเนื่องต่อไป และมีระบบกำกับการสูบน้ำให้มีระดับในแอ่งน้ำหลักในช่วง 20 ถึง 30 เมตรจากผิวดิน (หรืออัตราสูบประมาณ 800,000 ลบม. ต่อวัน) ในระยะยาว เมื่อมีการบริหารการพัฒนาเมือง ให้สอดคล้องกับการลงทุนในสาธารณูปโภคด้านน้ำ รวมถึง มาตรการป้องกันน้ำท่วมและระบายน้ำที่ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้สภาพแผ่นดินทรุดอยู่ในอัตราที่ควบคุมได้ (ไม่เกิน 1.0 ซม. ต่อปี) ในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการติดตามแผ่นดินทรุด การวิเคราะห์การไหล และแผ่นดินทรุด ดังนั้นควรพิจารณาศึกษานำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ประกอบการจัดการปัญหาแผ่นดินทรุดต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมการผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.การผังเมืองในรัชสมัยพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช.กรุงเทพมหานคร, 2542.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, โครงการศึกษาผลกระทบจากการแก้ไขปัญหาการใช้น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, พฤศจิกายน 2547.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.มปพ.การประกอบกิจการน้ำบาดาล ในพื้นที่วิกฤตการณ์น้ำบาดาล. กรุงเทพมหานคร, 2548.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการประเมินผลกระทบจากการบังคับใช้กฎหมายเกี่ยวกับการกำหนดค่าอนุรักษ์น้ำบาดาลในเขตวิกฤตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. กรุงเทพมหานคร, 2550.

กรมทรัพยากรธรณี. แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย, มาตราส่วน 1:250,0000, ระวาง ND 47-8. กองธรณีวิทยา, 2528.

กรมแผนที่ทหาร กรมโยธาธิการและผังเมือง.2536.โครงการสำรวจระดับการทรุดตัวของแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2536 รายงานผลการสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล .กรุงเทพมหานคร, 2536.

กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.มปพ.ผังภาคกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ปี พ.ศ. 2600. กรุงเทพมหานคร, 2542.

กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.มปพ.ผังภาคกลางปี พ.ศ.2600. กรุงเทพมหานคร.

กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. รายงานการศึกษาฉบับสุดท้าย โครงการวางและจัดทำผังภาคกรุงเทพมหานครและปริมณฑลปี พ.ศ. 2600. กรุงเทพมหานคร, 2550.

กรุงเทพมหานคร.มปพ. แผนบริหารราชการกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2552-2555 .กรุงเทพมหานคร.

กองยีออเดซีและออฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหาร. โครงการป้องกันและแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำบาดาลและแผ่นดินทรุดในเขตกรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร, 2529.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. โครงการศึกษาผลกระทบจากการแก้ปัญหาการใช้น้ำบาดาลเกินปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, พฤศจิกายน 2547.

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.มปพ.เอกสารประกอบการเสวนาทางวิชาการ เรื่อง กรอบแนวคิดการควบคุมการเติบโตของเมืองและผลการประเมินผังเมืองรวมกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2549. กรุงเทพมหานคร, 2549.

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.การศึกษาโครงการจัดทำแผนผังพัฒนาเขตกรุงเทพมหานคร เขตปทุมวัน. กรุงเทพมหานคร, 2544.

คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.พรมแดนความรู้ด้านการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรไทย. กรุงเทพมหานคร.

คำรบลักษณ์ สุรัสวดี. การศึกษาและการวิจัยเพื่อชี้นำและกำหนดกรอบนโยบายการพัฒนาเมือง “กรุงเทพมหานครและปริมณฑล” กับการแก้ปัญหาจราจร. กรุงเทพมหานคร, 2543.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.มปพ.รายงานฉบับสมบูรณ์ การศึกษาเพื่อจัดทำแผนและผังพัฒนาเขต: เขตลาดกระบัง . กรุงเทพมหานคร.

บริษัท กรุงเทพธนาคม จำกัด. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่2 (ด้านส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม) โครงการวางและจัดทำผังเมืองรวมกรุงเทพมหานคร (ปรับปรุงครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร, 2545.

บริษัท ปตท จำกัด. โครงการศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากดินทรดต่อการเชื่อมต่อระบบท่อส่งก๊าซ, 2551.

ทวีวงศ์ ศรีบุรี. “การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการทรุดตัวของพื้นดินในกรุงเทพมหานคร”. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทวีวงศ์ ศรีบุรี.รายงานการวิจัย การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการทรุดตัวของพื้นดินในกรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร, 2541.

เทศบาลนครสมุทรสาคร.แผนพัฒนาเทศบาลนครสมุทรสาครสามปี พ.ศ.2552-2554 เล่ม 2 . สมุทรสาคร, .2551.

ปณต ศิริพุทธิชัยกุล. การจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลางตอนล่าง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร, 2545.

ปราโมทย์ ประสาทกุล.ประชากรศาสตร์ สารัตถศึกษาเรื่องประชากรมนุษย์.กรุงเทพมหานคร, 2543.

มิ่งสรรพ์ ขาวสะอาด. ภาพรวมของปัญหาการจัดการน้ำในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย, 2538.

วรรณศิลป์ พีรพันธุ์. เอกสารประกอบการบรรยาย วิชา เทคนิคการวิเคราะห์สำหรับการวางแผน.ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร, 2552.

วินัย เชาวน์วิวัฒน์. การจำลองสภาพการรุกล้ำของน้ำเค็มในชั้นน้ำนนทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย. รายงานการสัมมนา เรื่อง น้ำท่วมและแผ่นดินทรุดในกรุงรัตนโกสินทร์. กรุงเทพมหานคร, 2525.

สภาที่ปรึกษาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. ยุทธศาสตร์ทางผังเมืองของประเทศไทย.กรุงเทพมหานคร, 2548.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.การคาดประมาณประชากรของประเทศไทย 2543-2568. กรุงเทพมหานคร, 2546.

สำนักผังเมือง. ผังเมืองรวมกรุงเทพมหานคร (ปรับปรุงครั้งที่1)กรุงเทพมหานคร, 2542.

สำนักผังเมือง. ยุทธศาสตร์ผังเมือง นำการพัฒนากรุงเทพมหานคร.กรุงเทพมหานคร, 2544.

สำนักผังเมือง.โครงการวางและจัดทำผังเมืองรวมกรุงเทพมหานคร (ฉบับปรับปรุงครั้งที่2). กรุงเทพมหานคร, 2546.

สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร.ผังเมืองรวมกรุงเทพมหานคร.กรุงเทพมหานคร, 2549.

สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร.มปพ.ยุทธศาสตร์ผังเมือง นำการพัฒนากรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานเขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร. แผนปฏิบัติราชการประจำปี พ.ศ. 2551 สำนักงานเขตปทุมวัน .กรุงเทพมหานคร, 2551.

สำนักพัฒนามาตรฐาน กรมโยธาธิการและผังเมือง.โครงการการศึกษาเพื่อจัดลำดับการพัฒนาเมือง การค้นหาเมืองคุณภาพด้วยมาตรฐานผังเมือง.กรุงเทพมหานคร, 2551.

สำนักสิ่งแวดล้อมกรุงเทพมหานคร.มปพ. หนังสือรายงาน และแผนปฏิบัติการว่าด้วยการลดปัญหาภาวะโลกร้อนของกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2550-2555. กรุงเทพมหานคร.

สุจริต คูณธนกุลวงศ์ และคณะ. โครงการการศึกษาศักยภาพและความต้องการใช้น้ำบาดาล เพื่อการจัดการน้ำบาดาลในพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลางตอนล่าง (รายงานฉบับสมบูรณ์) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2545.

สุจริต คูณธนกุลวงศ์ และคณะ. การจัดการน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

สุจริต คูณธนกุลวงศ์ และคณะ, สถานการณ์การใช้น้ำของประเทศไทย. หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

สุจริต คูณธนกุลวงศ์ และโชคชัย สุทธิธรรมจิต. การหาศักยภาพแอ่งน้ำบาดาล. หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

สำนักนโยบายและแผนการจราจรและขนส่ง. รายงานขั้นสุดท้าย โครงการประสานการก่อสร้างโครงการขนส่งขนาดใหญ่ระยะที่ 7. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่, 2546.

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาข้อมูลและศักยภาพการพัฒนาแหล่งน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. กันยายน 2542.

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. โครงการสำรวจ ศึกษาเพื่อการวางแผนหลักและกำหนดแนวคิดการออกแบบเบื้องต้น โครงการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาลเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี, มิถุนายน 2543.

อดิสัย จารุรัตน์, สถานการณ์แผ่นดินทรุดบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล, สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, มกราคม 2550.

ภาษาอังกฤษ

AIT. Investigation of land subsidence caused by deep caused by deep well pumping in the Bangkok area. Comprehensive Report of A.I. of Technology NEB. PEB9, 1982.

AIT, Investigation of land subsidence caused by deep caused by deep well pumping in the Bangkok area. Comprehensive Report of Asian .Institute of Technology. NEB. Pub. 1982-002, 1982.

AIT. Geotechnical History of the Development of the Suvarnabhumi International Airport, 2001.

Babu D.K., Pinder, G.F., Niemi, A., Ahlfeld, D.P., Stothoff, S.A., and Zeitoun D.G., Chemical Transport by Three Dimensional Density Dependant Groundwater Flows - Princeton Report 01/93/243.1. Biot, M. A. 1941. General theory of three-dimensional consolidation. J. Appl. Phys., 12(2), 155-164., 1993.

Bachmat Y., "compartmental model for the Yarkon Taninim aquifer" Report of the Hyrological Service of Israel, 1995.

Bear J., Hydraulics of groundwater, Mac Graw –Hill, Series in water Resources and Environmental Engineering, 1979.

Biot, M. A. General theory of three-dimensional consolidation. J. Appl. Phys., 12:155-64. 1941.

Brand, E.W.and Balasubramaniam A.S. Soil Compressibility and Land Subsidence in Bangkok, Proceedings of the Second International Symposium on Land Subsidence, Anaheim, California,pp.365-374, 1976.

Broms (B.B.)- Piles foundations. Piles groups. (Foundations on piles. Group of piles). Europe Congress on Soil Mechanics. Vienna (in French), 1976.

Brozovic N., Sunding D.L. and Zilberman D. 2005, "optimal Management of Groundwater over space and time" . Chapter 1 in Frontiers in Water Resource Economics. D. Berga and R. Goetz, eds. New York. Springer Verlag, 2005.

Campana M.E., Harrington G.A. and Tezcan L. "Comparmental Model Approaches to Groundwater Flow Simulation" Chapter 3 in Frontiers in Water Resource Economics. D. Berga and R. Goetz, eds. New York. Springer Verlag, 2005.

China Daily, China's Cities Sinking due to Groundwater Pumping. http://www.wwdmag.com, December, 12, 2003.

Cox, J.B., A Review of the Engineering Characteristics of the Recent Marine Clays in Southeast Asia, Research Report vol. 6, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand ,1968.

Cours de mecanique des sols- enseignement specialise –Ecole des ponts et Chaussees-Les foundations, 1980.

Dagan D.G. and Zeitoun D.G., '' Steady Interface in Stratified Aquifers of Random Permeability Distribution'' Chapter 7, Seawater Intrusion in Coastal Aquifers edited by J. Bear, A.H-D Cheng, I. Herrera, S. Sorek and D. Ouazar Kluwer Academic Publisher. The Netherlands, 1999.

Domenico, Patrick A.; Schwartz, Franklin W. Physical and Chemical Hydrogeology - 2nd Edition.John Wiley & Sons, 1997.

Durban, D.,Zeitoun, D.-G., Benaim, H.E.,(1990),'' Finite Linear Viscoelasticity'' Journal of the American Society of Mechanical Engineering, Vol. 116, No 11 November 1990.

Frank, V. and Daniel A.B. Environmental and Social Impact Assessment. John Wiley & Sons: England, 1995.

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. Groundwater Potential in Lower Central Part of Thailand, 2002.

Faculty of Engineering, Kasetsart University, Effects of Groundwater Over-Pumping Mitigation: Mathematical Model Study. Final Report, 2004.

Fahey Martin. Soil Mechanics course at the School of Civil & Resource Engineering at the University of Western Australia.

Foster Stephen , et. Al., World Bank, Technical Report No. 463, Groundwater in Rural Development, 2000.

Gambolati, G. & Teatini, P., Natural land subsidence due to sediment compaction of the Upper Adriatic sea basin. *Ingegneria e Geologia degli Acquiferi (IGEA)* XXXV, 2-3, 29-40, Torino, Italia, 1998.

Gambolati, G. et al., The importance of poroelastic coupling in dynamically active aquifers of the Po river basin, Italy. Water Resour. Res., 36(9), 2443-2459, 2000.

Giao P.H., Phien-Wey N. and Honjo Y. “FEM quasi-3D modeling of responses to artificial recharge in the Bangkok multi-aquifer system. Environmental Modeling &software Vol. 14- PP141-151 -1999, 1999.

Gupta D. and N. Yapa. Saltwater Encroachment in an Aquifer: A Case Study, Water Resources Research, Vol.18. No. 3, pp. 546-556, 1982.

Haley and Aldrich, Inc., Effect of deep well pumping on land subsidence in Bangkok : in Master Plan, Water Supply and Distribution, Metropolitan Bangkok, Vol. 4, 1970.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p., 2000.

Hem, J.D., 1970 Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, U.S.G.S. Paper 1473.

Hsieh, P.A., Deformation-induced changes in hydraulic head during ground-water withdrawal. Ground Water, 34, 6, 1082-1089.5. MODFLOW-2000, Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p., 1996.

Hueckel T. On effective stress concepts and deformation in clays subjected to environmental loads: Discussion, Can. Geotech. J. 29, 1120-1125, 1992.

Institute Global Environmental Strategies. Sustainable Groundwater Management in Asia Cities.Kanagawa: Japan, 2006.

Jarupongsakul, T., Suksri, C., Saraphirome, S., Suwanwerakamton, R. and Hashizume,M. Using GIS/RS/GPS for studying tropical monsoon disaster in the lower central plain of Thailand. (Abstract). in International Workshop on GAME-Tropics, National Research Council of Thailand, Kanchanaburi, pp. 336, 1999.

JICA. The Study on Management of Groundwater and Land Subsidence in the Bangkok Metropolitan Area and Its Vicinity. Department of Mineral resources, March 1995.

Koontanakulvong, S. and Siriputtichaikul P. Groundwater Modeling In the North Part of the Lower Central Plain, Thailand, International Conference On Water and Environment, Bhopal, India, Vol.Ground Water Pollution No.19, pp. 180-187, 2003.

Mahlknecht J, Steinich B. and Navarro de Leon I., Groundwater chemistry and mass transfers in the independence aquifer, central Mexico, by using multivariate

statistics, Environmental Geology Vol. 45-pp 781-795, 2004.

Mark, W. Rosegrant; Ximing, Cai and Sarah, A. Cline. Global Water Outlook to 2025 : Averting and Impending Crisis. Washington D.C. USA: IFPRI, 2002.

Melloul A.. and Zeitoun D.G. '' A Semi-Empirical Approach to Intrusion monitoring in Israeli Coastal Aquifer'', Chapter 16; Seawater Intrusion in Coastal Aquifers edited by J. Bear, A.H-D Cheng, I. Herrera, S. Sorek and D. Ouazar 1999 Kluwer Academic Publisher. The Netherlands, 1999.

MODFLOW-2000, Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p., 2000.

Nelson S.A. Course on Geology, Tulane University, 2000.

Nguyen C.D., Hiroyuki A., Hiroyuki Y. and Kenichi K., Simulation of groundwater flow and environmental effects resulting from pumping. Environmental geology Vol. 47-pp 361-372., 2005.

Phatcharasak Arlai. Numerical Modeling of possible Saltwater Intrusion Mechanisms in the Multiple-Layer Coastal Aquifer System of the Gulf of Thailand. Doctoral dissertation, University of Kassel, 2007.

Phien-wey N.. , Giao P.H. and Nutalaya P.- Land subsidence in Bangkok, Thailand. Engineering Geology Vol. 82 pp.187-201, 2006.

Pianchareon C, Groundwater and land subsidence in Bangkok, Thailand, Proceedings of the Second International Symposium on Land Subsidence, Anaheim, California (1976), pp. 355–364, 1976.

Poland J.F. and Davis G.H., 1969 Land Subsidence due to withdrawal of fluids, Geological Society of America Inc., Reviews in Engineering Geology II p. 187-269.

Ramnarong V, Environmental Impacts of heavy groundwater development in Bangkok, Thailand. Proc. Of international conference on groundwater and man, Sydney. Vol 2, pp. 345-350, 1983.

Ramnarong and Buapeng, Mitigation of groundwater crisis and land subsidence in Bangkok. J. Thai Geosciences. 2 : 125-137, 1991.

Ramnarong and Buapeng, Groundwater Resources of Bangkok and its vicinity impact and management, 14-24 November 1992, National Conference on “geologic Resources of Thailand: Potential for Future development” Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, 1992.

R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, 1998.

Sneed M. and Devin L., Galloway Aquifer-System Compaction: Analyses and Simulations-the Holly Site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4015, 2005.

SUB Package US DEPARTMENT OF THE INTERIOR US GEOLOGICAL SURVEY MODFLOW- 2000 Ground-Water Model—User Guide to the Subsidence and Aquifer-System-Compaction (SUB) PackageOpen-File Report 03—233 US., 2000.

Sucharit K. et.al. Groundwater Potential and Demand Study for GW Management in the Northern Part of Lower Central Plain, Research Report submitted to the Thailand Research Fund, 2002.

Sucharit K. and Chokchai S. Industrial Water Use Situation in Bangkok Area and Its Vicinity and Factories’ recommendations, Jour. of Engineering Institute of Thailand, 2005.

Sucharit K. and Chokchai S. Industrial Water Use Estimate in Bangkok Metropolitan Area and Its Vicinity, Jour. of IWRA, 2007.

Teparaksa, W. Principle and application of instrumentation for the first MRTA subway project in Bangkok, 5^{th} *International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Singapore, 1999.

Todd, D.K. Ground-water hydrology. 2nd Edition. John Wiley and Sons, New. York, 1980.

Toshinobu Akagi, Some Land Subsidence Experiences in Japan and their Relevance to Subsidench in Bangkok,Thailand,Geotechnical Engineering,S.E.Asian Soc.soil Eng.,Bangkok,pp.1-48, 1997.

Tonyagate, W. Geotechnical Properties of Bangkok. Subsoils for Subsidence Analysis. M.Eng.Thesis No. 1298, AIT, Bangkok, 1978.

Van Vliet, K. J., 3.032 Mechanical Behavior of Materials, MIT, 2006.

Zeitoun D.G. A multiple cells model for the management of large scale aquifers, Environmental management and assessment.

Zeitoun, D.-G. ,Baker, R. and J. Uzan, ''Application of Random Elasticity for Soil Engineering''- Structural Safety, Vol. 5, pp. 79-93, 1988.

Zeitoun D.-G. and Baker R. '' A Wave-number Domain Approach for Soil Variability Analysis''. A.S.C.E. journal of geotechnical Engineering, Vol 117,N0 7, July 1991.

Zeitoun D. -G. and C. Braester ''A Neumann expansion approach to flow through heterogenous Formations'' Stochastic Hydrology and Hydraulics, Vol. 5, N0 3,1991.

Zeitoun D.-G. and Baker R. '' A Stochastic Approach for Settlement predictions of Shallow Foundations'' Geotechnique, Vol. 42,617-629. N0 4, 1993.

Zeitoun D.G. and Pinder G.F. '' An Optimal-Least Squares Method for solving Coupled Flow-Transport Systems'' Water Resources Research, Vol. 29, N0 2, p. 217-227- Feb. 1993.

Zeitoun D.G. and J. Uzan, ''Derivation of material variability from settlement measurements'' International Journal for numerical and analytical methods in Geomechanics, Vol. 17, 303-322 May 1993.

Zeitoun, D.G. and Pinder, G.F., An optimal Control Least Squares Method for solving Coupled Flow Transport Systems. Water Resources Research, Vol. 29, No. 2, pp. 217-227, 1993.

Zeitoun D. G., Laible J. and Pinder G.P. ''A weighted Least Squares Method for First Order Hyperbolic Systems''. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol 20, p.191-212, 1995.

Zeitoun D. G., Laible J. and Pinder G.P. '' An Iterative Penalty Method for the Least Squares Solution of Boundary Value Problems''. Numerical Methods for Partial Differential

Equations,I. 13, number 3, may ,1997.

ZeitounD.G. and Melloul A. “Decision support systems (D.S.S.) based on automatic water balance computation for groundwater management planning: The case of Israel’s Coastal aquifer” Chapter in Geoinformatics for Natural Resource Management, NOVA Science Publishers, Inc., 2008.

ZHANG Chunhui and GUO Haiyan, "Time-Space Coupled Predicting Model of Land Subsidence Caused by Groundwater Exploitation Based on Stochastic Medium Theory". International Conference on Safety Science and Technology, Chanchai 2006.

อื่น ๆ

กรมทรัพยากรธรณี, 2552. แหล่งที่มา: http://www.dmr.go.th

กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552. แหล่งที่มา: http://www.dpt.go.th/nrp/about1/report6regional/BKK _report/BKK02.pdf

สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร, 2552. แหล่งที่มา: http://www.bma-cpd.go.th

Borathailand, 2009. Source: http://www.borathailand.org

ESCAP, 2009. Source: http://www.unescap.org/enrd/water_mineral/Land_Maps.htm

Global Land Cover Facility, 2009. Source: http://www.landcover.org/research/portal/geocover/

Global Land Survey, 2009. Source: http://gls.umd.edu

LandScan, 2009. Source: http://www.ornl.gov/sci/landscan/

หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทร: 02-218-6426 แฟ็กซ์: 02-218-6425 www.watercu.eng.chula.ac.th e-mail: cu_wrsru@hotmail.com