

คลื่นสึนามิทะเลอันดามัน

Andaman Tsunami

ภูเวียง ประคำมินทร์¹

บทนำ

วันอาทิตย์ที่ 26 ธันวาคม ค.ศ. 2004 เวลา 07.58 น. ตามเวลาประเทศไทย ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ (Megathrust) มีขนาด 9.3 ริคเตอร์ (Mw) ทำให้เกิดคลื่นสึนามิ ในบริเวณมหาสมุทรอินเดีย โถมเข้าฝั่งกวาดทำลายหลายประเทศรอบๆ มหาสมุทรอินเดีย ทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวนมาก เฉพาะที่ประเทศไทย มีจำนวนมากถึง 5,395 คน บาดเจ็บ และสูญหายเป็นจำนวนมาก พฤติกรรมของคลื่นสึนามิ ความเร็วของคลื่นสึนามิขณะอยู่ในน้ำลึก และน้ำตื้น คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงพลังงานของคลื่นเมื่ออยู่บริเวณน้ำตื้น หรือลึก ลักษณะการโถมเข้าฝั่งของแต่ละลักษณะพื้นที่ การซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ (Run-up) การแผ่เข้าท่วมลึกเข้าไปในแผ่นดิน (Inundation) มีความแตกต่างกัน ดังนั้น ความเสียหายของแต่ละพื้นที่ จึงเกิดขึ้นไม่เท่ากัน บางแห่งสูญเสียน้อย บางแห่งกลับสูญเสียมาก ไม่เพียงแต่ความสูญเสียที่เกิดขึ้นต่อชีวิต และทรัพย์สินเท่านั้น สิ่งแวดล้อมยังถูกทำลายด้วยซึ่งไม่สามารถประเมินค่าได้ เช่น น้ำได้ดินเปลี่ยนคุณสมบัติไปไม่สามารถนำมาใช้ได้ อีก ต้นไม้ยืนต้นตายจากความเค็มของน้ำทะเลที่เหือดแห้งเป็นเกล็ดตกค้างอยู่ พื้นที่ไร่นา ไม่สามารถเพาะปลูกได้ต่อไปอีก เป็นต้น

แต่ละพื้นที่บริเวณชายฝั่งภาคใต้ฝั่งตะวันตกของประเทศไทยนั้น มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน ดังนั้นจึงส่งผลถึงลักษณะของคลื่นสึนามิที่แผ่เข้ามา โดยเฉพาะการซัดขึ้นไปในพื้นที่ของคลื่นสึนามิ (Run-up)

ลักษณะทางกายภาพของภาคใต้ฝั่งตะวันตก (ฝั่งอันดามัน)

ภาคใต้ฝั่งตะวันตกประกอบด้วย 6 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง และสตูล ภาคใต้ฝั่งตะวันตกมีทิศเหนือจรดจังหวัดชุมพร และ สหภาพพม่า ทิศตะวันออกจรดภาคใต้ฝั่งตะวันออก ทิศใต้จรดประเทศมาเลเซีย และด้านทิศตะวันตกจรดทะเลอันดามันตลอดแนวทั้ง 6 จังหวัด ลักษณะภูมิประเทศ แบ่งเป็นลักษณะภูเขา แม่น้ำ ที่ราบ ดังนี้

ภูเขา มีลักษณะทอดตัวตามแนวเหนือ-ใต้

- เทือกเขาภูเก็ต แนวเทือกเขาภูเก็ตเป็นเทือกเขาที่ต่อเนื่องจากเทือกเขาตะนาวศรีในเขตจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นแนวยาวต่อเข้าไปในจังหวัดชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี พังงา และภูเก็ต โดยมียอดเขาพนมเบญจาเป็นยอดเขาที่สูงที่สุดในเทือกเขาภูเก็ต คือ มีความสูงประมาณ 1,397 เมตร อยู่ระหว่างเขตจังหวัดสุราษฎร์ธานีกับจังหวัดกระบี่

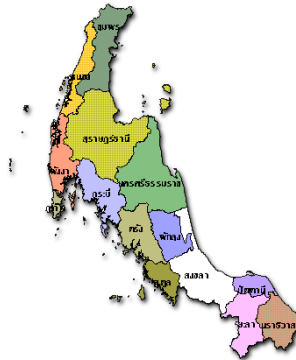
แม่น้ำ ที่สำคัญ

- แม่น้ำกระบี่ เกิดจากแม่น้ำสายเล็ก ๆ 2 สาย คือ คลองหั่นกะเดียงกับคลองกระนัย ไหลมารวมกันในเขตอำเภอกระบี่ กลายเป็นแม่น้ำกระบี่ โดยที่แม่น้ำสองสายนั้นเกิดจากเทือกเขาตะนาวศรีและมีแม่น้ำปากจั่นไหลมารวมกันกับแม่น้ำกระบี่ แล้วไหลลงสู่ทะเลอันดามันในมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งมีความยาวประมาณ 135 กิโลเมตร **เขตที่ราบ** ในเขตภาคใต้ มีลักษณะแคบ ๆ ยาวขนานไปกับชายฝั่งทะเล และเทือกเขา

¹ ผู้อำนวยการส่วนประมวลผลข้อมูลและสถิติแผ่นดินไหว สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา

- บริเวณชายฝั่งทะเลด้านตะวันตกของภาคใต้มีลักษณะเว้าแหว่งมากกว่าด้านตะวันออก แต่เขตที่ราบด้านตะวันตกจะเป็นบริเวณแคบ ๆ ขนานกับชายฝั่งทะเล ส่วนที่ราบลุ่มแม่น้ำที่สำคัญในเขตนี้ ได้แก่ ที่ราบบริเวณลุ่มแม่น้ำกระบุรี ในจังหวัดระนอง และที่ราบลุ่มแม่น้ำพังงา ในเขตจังหวัดพังงา เป็นต้น

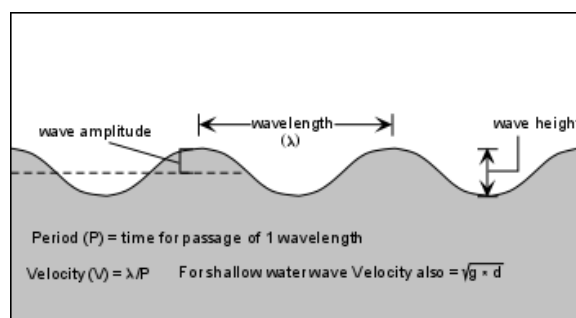
เกาะ ที่สำคัญต่อการท่องเที่ยวเช่น เกาะสิมิลัน เกาะภูเก็ต เกาะพีพี เกาะลันตา เกาะอาดัง – ราวี และเกาะตะรุเตา นอกจากนี้ยังมีเกาะแก่งต่างๆขนาดเล็ก จำนวนมาก (ที่มา : สำนักพัฒนาอุทยานวิทยา)



รูปที่ 1 ภาคใต้ฝั่งตะวันตกประกอบด้วยจังหวัดระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง และสตูล
(ที่มา : <http://www.onep.go.th/projects/rock/images/mapso.gif>)

คลื่นสึนามิ คืออะไร

คลื่นสึนามิ เป็นคลื่นในท่าเรือหรืออ่าว พบโดยนักวิชาการชาวญี่ปุ่น คลื่นสึนามิ มีสาเหตุการเกิดหลายอย่าง เช่น ภูเขาไฟ ระเบิด แผ่นดินไหว อุกบาตคกสู่ท้องทะเล(แม้ว่าจะยังไม่เคยเกิดมาก่อนก็ตาม) การทดลองระเบิดนิวเคลียร์ แผ่นดินถล่มใต้ทะเล แม้แต่หน้าผาริมทะเลพังทลายก็สามารถทำให้เกิดคลื่นสึนามิได้ทั้งนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลื่นสึนามิที่เกิดจากแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ ดังเช่นวันที่ 26 ธันวาคม 2004 ที่ผ่านมา ยังความเสียหายใหญ่หลวงต่อประชาชนชาวไทยใน 6 จังหวัดอันดามันของไทย



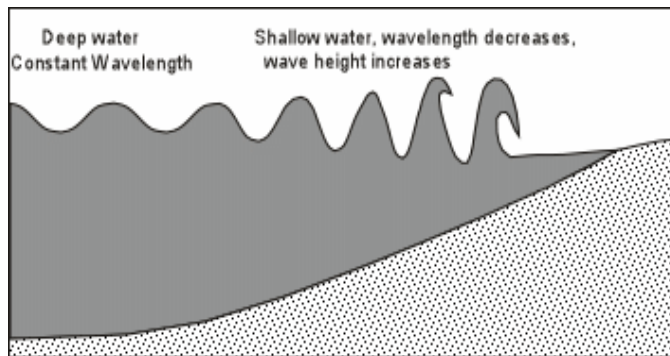
รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของคลื่นในทะเล
(ที่มา : <http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?Aid=267>)

ลักษณะทางกายภาพของคลื่นสึนามิ

ความเร็วของคลื่นจากรูปที่ 2 สามารถหาได้จากสมการ $V = \frac{\lambda}{P}$ -----(1.1) โดย

λ ความยาวคลื่นคือระยะห่างจากยอดคลื่นหนึ่งไปยังยอดคลื่นถัดไป
P คือคาบเวลาระหว่างยอดคลื่นหนึ่งเดินทางมาถึงที่ที่ยอดคลื่นก่อนหน้าเพิ่งผ่านไป
Amplitude ของคลื่นคือความสูงของยอดคลื่นนับจากระดับน้ำทะเล

ความเร็วของคลื่น (Velocity - V) คลื่นทะเลทั่วไปมีความเร็วประมาณ 90 กม./ชั่วโมง แต่ คลื่นสึนามิ อาจจะมี ความเร็วได้ถึง 950 กม./ชั่วโมง ซึ่งก็พอๆกับความเร็วของเครื่องบินเจ็ทที่เดียว โดยจะขึ้นอยู่กับความลึกที่เกิดแผ่นดินถล่ม ได้ทะเล ถ้าแผ่นดินไหวยังเกิดที่ก้นทะเลลึกเท่าไร ความเร็วของ คลื่นสึนามิ ก็จะสูงขึ้นมากเท่านั้น เพราะปริมาณน้ำที่ถูก เคลื่อนออกจากที่เดิม จะมีมากขึ้นไปตามความลึก คลื่นสึนามิ จึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านท้องทะเลอันกว้างใหญ่ได้ภายในเวลา ไม่นาน



รูปที่ 3 คลื่นสึนามิ จะมีอำนาจทำลายล้างสูงเมื่ออยู่บริเวณน้ำตื้น (ที่มา: Prof. Stephen A. Nelson)

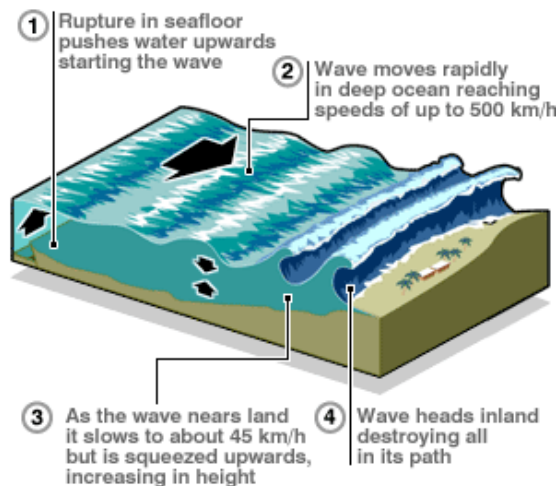
คลื่นสึนามิ ต่างจากคลื่นทะเลทั่วไป โดยคลื่นทะเลทั่วไปเกิดจากลมพัดผลักดันน้ำส่วนที่อยู่ติดผิว จะมีคาบการเดินทางเพียง 20-30 วินาทีจากยอดคลื่นหนึ่งไปยังอีกยอดหนึ่ง และระยะห่างระหว่างยอดคลื่น หรือความยาวคลื่น มีเพียง 100-200 เมตรแต่คลื่นสึนามิ มีคาบตั้งแต่ สิบนาทีไปจนถึงสองชั่วโมง และ ความยาวคลื่นมากกว่า 500 กิโลเมตรขึ้นไป คลื่นสึนามิ ถูกจัดว่า เป็นคลื่นน้ำตื้น คลื่นที่ถูกจัดว่าเป็น คลื่นน้ำตื้น คือ คลื่นที่ ค่าอัตราส่วนระหว่าง ความลึกของน้ำ และ ความยาวคลื่น ต่ำมาก

อัตราการสูญเสียพลังงานของคลื่นจะผกผันกับความยาวคลื่น (ระยะห่างระหว่างยอดคลื่น) ยกกำลังสองเนื่องจาก คลื่นสึนามิ มีความยาวคลื่นมากๆ ยิ่งยกกำลังสองเข้าไปอีก จึงสูญเสียพลังงานไปน้อยมากๆ ในขณะที่มันเคลื่อนตัวผ่านพื้น มหาสมุทร และเนื่องจาก คลื่นสึนามิ เป็น คลื่นน้ำตื้น จะมีความเร็วเท่ากับ

$$v = \sqrt{gd} \quad \text{--- (1.2)}$$

g คือ อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก ซึ่งมีค่า 9.815 m/s^2 และ

d คือ ความลึกของพื้นทะเล



รูปที่ 4 คลื่นสึนามิเคลื่อนที่เร็วมากเมื่ออยู่ในทะเลลึก และมีอำนาจทำลายล้างอย่างรุนแรงเมื่อเข้าสู่ฝั่ง
(ที่มา : Prof. Stephen A. Nelson)

ความเร็วของคลื่นสึนามิ

สมมติว่า แผ่นดินไหวเกิดที่ท้องทะเลลึก 6,100 เมตร คลื่นสึนามิจะเดินทางด้วยความเร็ว ประมาณ 880 กม./ชม. ซึ่งจะสามารถเดินทางข้ามฝั่งมหาสมุทรแปซิฟิก ด้วยเวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมงเสียอีก เมื่อ คลื่นสึนามิ เดินทางมาถึงชายฝั่ง ก้นทะเลที่ตื้นขึ้นก็จะทำให้ความเร็วของคลื่นลดลง เพราะความเร็วของคลื่น สัมพันธ์กับค่าความลึกโดยตรง แต่คาบยังคงที่ พลังงานรวมที่มีค่าคงที่ ก็จะถูกถ่ายเทไปดันตัวให้คลื่นสูงขึ้น

จากสมการ 1.1 ค่าความเร็ว $V = \lambda / P$

ถ้า V ลดลง, P คงที่ ค่า λ ก็ต้องลดลง ผลก็คือ น้ำทะเลถูกอัดเข้ามา ทำให้คลื่นสูงขึ้น ขึ้นอยู่กับสภาพชายฝั่งว่าเป็นอ่าวแคบหรือกว้าง ในชายฝั่งที่แคบ คลื่นสึนามิจะมีความสูงได้หลายๆ เมตรทีเดียว ถ้าท้องคลื่นเข้าถึงฝั่งก่อน ก็จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Drag down คือดูเหมือนระดับน้ำจะลดลงอย่างกะทันหัน ขอบน้ำทะเลจะหดตัวออกจากฝั่งไปเป็นร้อยๆ เมตรอย่างฉับพลัน และในทันทีที่ขยอคลื่นต่อมาได้มาถึง ก็จะเป็นกำแพงคลื่นสูงมาก น้ำที่ท่วมเข้าฝั่งกะทันหัน อาจไปไกลได้ถึง 500 เมตร แต่คลื่นสึนามิ สามารถเดินทางขึ้นไปตามปากแม่น้ำ หรือ ลำคลองที่ไหลลงทะเลตรงนั้นได้ด้วย หากรู้ตัวว่าจะมีคลื่นสึนามิ ผู้คนเพียงแต่อพยพออกไปจากฝั่งเพียงแค่นา 15 นาที ให้อยู่ห่างจากแหล่งน้ำที่ไหลลงทะเลเข้าไว้ และพยายามอยู่ที่สูงก็จะปลอดภัยแล้ว

มนุษย์เริ่มเข้าใจปรากฏการณ์ใต้ดินนี้มากขึ้นเมื่อประมาณ 50 ปีมานี้เอง โดยได้พบว่าเวลาเกิดแผ่นดินไหว คลื่นแผ่นดินไหวทุกคลื่นจะดูเหมือนเคลื่อนที่ออกมาจากตำแหน่งหนึ่งใต้ดิน ซึ่งนักธรณีวิทยาเรียกตำแหน่งดังกล่าวนี้ว่า “จุดโฟกัส” (Hypo Center) และตำแหน่งบนผิวโลกที่อยู่เหนือจุดโฟกัสเรียกว่า “อีพิเซนเตอร์” (Epicenter) และตามปกติจุดโฟกัสของคลื่นแผ่นดินไหวมักจะอยู่ลึกได้ไกลลงประมาณ 33 กิโลเมตร แต่ในบางกรณีระยะลึกของจุดโฟกัสอาจจะมากถึง 400 กิโลเมตร หรือมากกว่า การเกิดคลื่นสึนามิ มักเกิดจากแผ่นดินไหวตื้น เป็นส่วนใหญ่

สาเหตุแห่ง “แผ่นดินไหว”

โลกเรานั้นมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ คือมีเปลือกนอกสุดห่อหุ้ม ซึ่งเปลือกนี้มีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น กรณี เปลือกโลกที่เป็นทวีปหรือแผ่นดินจะหนาประมาณ 70 กิโลเมตร และเปลือกโลกส่วนที่อยู่ท้องมหาสมุทรจะหนาประมาณ 10 กิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 0.6% ของรัศมีโลกเท่านั้นเอง ลึกลงไปจากเปลือกโลกก็ถึงชั้นของโลกอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “เนื้อโลก” (mantle) ตามปกติคลื่นแผ่นดินไหวในเปลือกโลกจะมีความเร็วประมาณ 7.2 กิโลเมตร/วินาที แต่ความเร็วของคลื่นในชั้นเนื้อโลกจะสูงกว่าคือ 8.2 กิโลเมตร/วินาที นอกจากนี้คลื่นแผ่นดินไวยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ คลื่นปฐมภูมิ (พี : P – primary) หรือคลื่นพี และ คลื่นทุติยภูมิ (เอส : S - secondary) หรือคลื่นเอส ซึ่งเวลาคลื่นทั้งสองชนิดเคลื่อนที่ผ่านไป ในชั้นหินได้ทั่วโลก อนุภาคต่างๆ ในชั้นหินที่ถูกคลื่นพิกระทบจะสั่นไปมาในแนวที่คลื่นพุ่งไป ดังนั้นชั้นหินจึงตกอยู่ในสภาพถูกอัดและขยายตัว ส่วนในกรณีของคลื่นเอสนั้น อนุภาคต่างๆ ในชั้นหินจะเคลื่อนที่ในแนวขึ้นลงที่ตั้งฉากกับทิศการพุ่งไปของคลื่น คลื่นพีนั้นตามปกติจะมีความเร็วกว่าคลื่นเอส ดังนั้น การวัดเวลาที่คลื่นทั้งพีและเอสเดินทางถึงเครื่องรับสัญญาณซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆบนผิวโลกจะทำให้ให้นักธรณีวิทยารู้ทันทีว่าจุดโฟกัสของการเกิดแผ่นดินไหวอยู่ที่ใด

อย่างไรก็ดี คลื่นพีสามารถเดินทางจากซีกโลกหนึ่งไปยังอีกซีกโลกหนึ่ง ในเวลาประมาณ 20 นาที ผ่านส่วนต่างๆ ภายในโลกได้ทุกส่วน ขณะที่คลื่นเอส เดินทางผ่านส่วนที่เป็นของเหลวไม่ได้ สำหรับคลื่นพีนั้นผิวต้องใช้เวลาหลายชั่วโมงกว่าจะเดินทางได้รอบโลก

นักแผ่นดินไหวใช้หลักการนี้ในการคำนวณระยะทางจากจุดตรวจ หรือสถานีตรวจแผ่นดินไหวไปยังศูนย์กลางแผ่นดินไหว หลักการคือ ใช้ผลต่างระหว่างเวลาของคลื่นพี (P-Wave: Primary Wave) กับคลื่นเอส (S-wave: Secondary Wave) ที่เดินทางถึงสถานีในการคำนวณระยะทางดังกล่าว ระยะเวลาคำนวณของคลื่นทั้งสองยิ่งมากเพียงใด ระยะทางก็ยิ่งไกลออกไปเพียงนั้นโดยปกติความแตกต่างของเวลาเพียง 1 วินาที จะคำนวณระยะทางได้ประมาณ 7.2 กิโลเมตร แต่ก็มีได้เป็นค่าจริงของความเร็วคลื่นแผ่นดินไหว เพราะในความเป็นจริงความเร็วของคลื่นแผ่นดินไหว มีปัจจัยเกี่ยวข้องมากมาย เช่น ลักษณะของโครงสร้างดิน ความชื้นในดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ถ้าสามารถหาระยะทางดังกล่าวได้อย่างน้อยสามสถานี เราข้อมกำหนดตำแหน่งของศูนย์กลางแผ่นดินไหวได้จากจุดตัดของวงกลมของสามสถานียดังกล่าว

แนวรอยเลื่อน (Fault Lines) เหตุหลักรุนแรงและไม่ทันตั้งตัว

เปลือกโลกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอทั้งการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และรวดเร็ว ซึ่งแรงที่ทำให้เปลือกโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า “แรงเทคโทนิค” (Tectonic Force) หรือ “แรงแปรสัณฐาน” อันเกิดจากความร้อนภายในโลก การขยายตัวและหดตัว รวมถึงการเคลื่อนไหวยของหินหลอมเหลว (Magma) ภายในโลกจากที่แห่งหนึ่งไปยังที่อีกแห่งหนึ่ง ซึ่งแรงเทคโทนิค แบ่งออกเป็น 2 พวก คือ

1- “กระบวนการไดเอสโตรฟิซึม” (Diastrophism) คือ รอยเลื่อนของผืนโลก ได้แก่ การโค้งงอ โค้งตัว และการแตกหักของผืนโลก และ

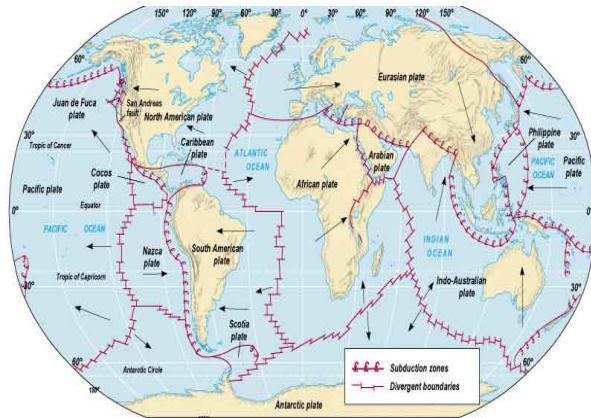
2- “กระบวนการโวลคาไนซึม” (Volcanism) หรือการระเบิดของภูเขาไฟนั่นเอง

ทั้งนี้ สาเหตุใหญ่ที่สุดในการเกิดแผ่นดินไหวก็คือ “แนวรอยเลื่อน (Fault Lines)” ที่กระทำต่อผิวโลกอาจทำให้เกิดเป็นที่ราบสูงหรือภูเขาได้ และยังทำให้เกิดน้ำตกร หรืออ่างน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งแผ่นดินไหวบางครั้งทำให้เปลือกโลกยุบตัวลง เกิดเป็นทะเลสาบที่เรียกว่า “ทะเลสาบอ่าง” (Basin Lake) ในบริเวณรอยเลื่อน และยังจะทำให้แผ่นดินเลื่อนและแผ่นดินถล่มได้อีกด้วย

ถ้ารอยเลื่อนเกิดภายใต้ท้องทะเล หรือมหาสมุทร โดยเฉพาะแนวสับคั่นชั้นอายุน้อยๆ เช่น บริเวณ เกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย แล้ว จะทำให้เกิดแผ่นดินไหวใต้ท้องทะเล ซึ่งทำให้เกิดคลื่นใหญ่เรียกว่า “คลื่นสึนามิ” (Tsunamis)

รอยต่อของแผ่นเปลือกโลกอันทำให้เกิด “แผ่นดินไหว”

ประมาณ 95% ของแผ่นดินไหวเกิดจากบริเวณรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกและบริเวณที่มีภูเขาไฟที่ยังคุกรุ่นอยู่ และมักเป็นพวกเทือกเขาเกิดใหม่ (Young Mountain) และเป็นบริเวณที่มีความไม่สมดุลในเรื่องแรงที่กระทำต่อผิวโลก จึงมีพวกไดแอสโตรฟีซึ่ม (Diastrophism) และโวลคานิซึ่ม (Volcanism) อยู่มากมาย และมักจะเกิดรอยเลื่อน จัดเป็นแนวความอ่อนแอของเปลือกโลก (Lines of weakness) โดยผ่าน “ทฤษฎีแผ่นเปลือกโลกเทคโทนิคส์ (Plate Tectonic Theory)” กล่าวไว้ว่า ชั้นนอกของโลก หรือชั้นธรณีภาค ประกอบด้วยแผ่นเปลือกโลกขนาดใหญ่ประมาณ 12 แผ่น และแผ่นเปลือกโลกเล็กๆ อีกเป็นจำนวนมาก แผ่นเปลือกโลกเหล่านี้มีรูปร่างรับกันตามรอยต่อของแผ่นเปลือกโลก ดังรูปที่ 5

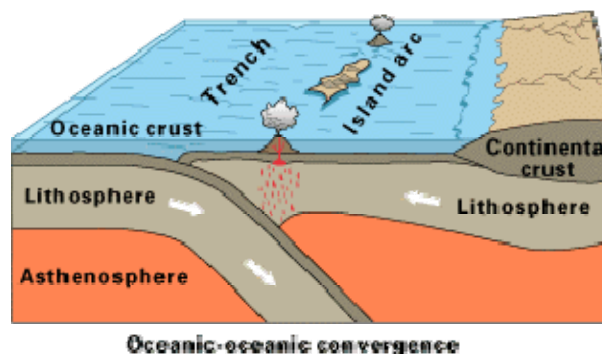


รูปที่ 5 Plate Tectonic (ที่มา: USGS)

รอยต่อของแผ่นเปลือกโลกเหล่านี้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

1. สันเขาในมหาสมุทร (Oceanic ridges) เป็นรอยต่อที่แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่แยกกัน โดยมีหินละลายปะทุขึ้นมาตามรอยแยกก่อเกิดเป็นเปลือกโลกรุ่นใหม่
2. รอยเลื่อนแปรสภาพ (Transform faults) เป็นรอยต่อที่แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่เฉียดกัน
3. เขตมุดตัวของเปลือกโลก (Subduction Zones) เป็นรอยต่อที่แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่ปะทะกัน แล้วแผ่นเปลือกโลกหนึ่งมุดตัวลงข้างใต้อีกแผ่นเปลือกโลกหนึ่งทำให้เปลือกโลกส่วนที่มุดนั้นหายลงไปในชั้นแมนเทิล

ทั้งนี้ รอยต่อของแผ่นเปลือกโลกที่ซับซ้อนที่สุด เป็นรอยต่อที่แผ่นเปลือกโลกสามแผ่นเปลือกโลกปะทะกัน เรียกว่า “รอยต่อสามผสาน” (triple junction) เช่น ที่ประเทศไต้หวัน เป็นต้น รอยต่อลักษณะนี้อาจประกอบด้วยรอยต่อต่างๆ ทั้งสามประเภทผสมผสานกัน และแผ่นดินไหวส่วนใหญ่เกิดขึ้นตามแนวรอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลก ตามที่กล่าวแล้ว



รูปที่ 6 แนวรอยมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (Subduction Zones) (ที่มา: USGS)

แม้รอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลกมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทก็ตาม แต่เราแบ่งแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นตามแนวรอยต่อเหล่านี้ออกเป็น 4 ประเภทคือ

1. แผ่นดินไหวตื้นที่เกิดขึ้นบริเวณสันเขาในมหาสมุทร
2. แผ่นดินไหวตื้น ที่เกิดขึ้นตามรอยเลื่อนแปรสภาพ เช่น รอยเลื่อนซานอันเดรียส ทางด้านตะวันตกของทวีปอเมริกาเหนือ
3. แผ่นดินไหวตื้น แผ่นดินไหวลึกปานกลาง และแผ่นดินไหวลึก ที่เกิดขึ้นตามแนวมุดตัวของเปลือกโลก บริเวณแนวโคงภูเขาไฟ
4. แผ่นดินไหวตื้น แผ่นดินไหวลึกปานกลาง และแผ่นดินไหวลึก ที่เกิดขึ้นตามแนวเทือกเขาสำคัญ ๆ เช่น เทือกเขาหิมาลัย แนวแผ่นดินไหวนี้เริ่มจากบริเวณทะเลเมดิเตอร์เรเนียนจนเกือบถึงประเทศจีน เป็นต้น

เมื่อ “แผ่นเปลือกโลก” แยกออกจากกันตามแนวแกนของสันเขากลางมหาสมุทร (Oceanic Ridge) เป็นพลังงานผลักดันออกทั้งสองข้างให้แผ่นเปลือกโลกเกิดการเคลื่อนที่ ขณะที่แผ่นเปลือกโลกแยกออกจากกัน มีรอยเลื่อน และการปะทุของลาวา ปรากฏขึ้นตรงรอยแยกกลางมหาสมุทร (Oceanic Ridge) ก่อให้เกิดภูเขา และผาชันตามแนวดังกล่าว บริเวณนี้เป็นแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว แนวภูเขาไฟ แถบแม่เหล็กสลับขั้วในหิน 2 ด้านของรอยแยก มีการไหลถ่ายความร้อนปริมาณสูงกว่าบริเวณอื่นบนเปลือกโลกหลายเท่า และการยกตัวของภูมิประเทศ พบว่าภูเขาไฟกว่า 200 แห่ง เรียงรายอยู่ตามแนวยกตัวของพื้นทะเลภูเขาไฟหลายแห่งยังมีพลังการไหลถ่ายความร้อนมีปริมาณสูงมาก

ทวีปส่วนใหญ่ตั้งอยู่บนแผ่นเปลือกโลก ที่มีรอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลก อันเป็นศูนย์กลางการเคลื่อนที่อยู่ในมหาสมุทร รอยแยกของแผ่นเปลือกโลกอัฟริกากับแผ่นเปลือกโลกยูเรเชียทำให้เกิดทะเลแดง และรอยแยกของแผ่นเปลือกโลกแปซิฟิกกับเพลทอเมริกาเหนือ ทำให้เกิดอ่าวแคลิฟอร์เนีย เป็นที่น่าประหลาดใจว่า ทั้งที่ทวีปเคลื่อนที่แยกกันไปเป็นเวลานานแล้ว กลับสามารถนำมาปะติดปะต่อกันตามแนวชายฝั่งทวีปได้อีก เหมือนเมื่อทวีปเพิ่งเริ่มเคลื่อนที่ครั้งแรก เป็นหลักฐานสำคัญอย่างแรก ที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดว่า เดิมทีโลกของเรานั้นเป็นพื้นทวีปแผ่นเดียวติดกันตลอดทั้งหมดเมื่อหลายพันล้านปีมาแล้ว

มาตราวัดขนาดและความรุนแรงของแผ่นดินไหว

นักธรณีวิทยาประมาณว่า ทุกวันจะมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นบนโลกนับ 1,000 ครั้ง แต่คนส่วนมากจะไม่รู้สึกรู้สึ เพราะมันสั้นและแผ่วเบาจนเกินไป เมื่อเหตุผลเป็นเช่นนี้ นั่นก็หมายความว่า 50% ของคลื่นแผ่นดินไหวอาจจะมิคนตรวจรับได้แต่อีก 50% ที่เหลือที่เกิดในบริเวณที่ไม่มีคนอาศัยก็จะไม่มีใครรู้สึกอะไรเลย

ขนาดของแผ่นดินไหว (Magnitude)

เป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่พื้นโลก ปลดปล่อยออกมาในรูปของการสั่นสะเทือน คำนวณได้จากการตรวจวัดค่าความสูงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัด ได้ด้วยเครื่องมือตรวจแผ่นดินไหว โดยเป็นค่าปริมาณที่บ่งชี้ขนาด ณ บริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหวมีหน่วยเป็น “ริกเตอร์”

ในปี ค.ศ. 1935 ริกเตอร์ (Charles Francis Richter) ได้เสนอมาตราการระบุความรุนแรงของภัยแผ่นดินไหวที่ผู้คนทั่วไปรู้จักกันจนทุกวันนี้ โดยริกเตอร์ได้แบ่งสเกลความรุนแรงออกหลายระดับ เช่น ระดับ 2 แสดงว่า ดังและเป็นภัยได้มากเท่าๆ กับเหตุการณ์ฟ้าผ่า ระดับ 4 แสดงว่า มีความเสียหายเล็กน้อย เกิดขึ้น ระดับ 6 คือรุนแรงเทียบเท่าการระเบิดของลูกระเบิดปรมาณูที่สหรัฐฯ ทิ้งลงที่เมืองฮิโรชิมา ประเทศญี่ปุ่น และระดับ 8.5 คือระดับโลกแตก

มาตราริกเตอร์ ริกเตอร์ (Charles Francis Richter) ได้แบ่งขนาดไว้ทั้งหมด 10 ระดับ เรียงจากน้อยไปหามากไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1935 และยังคงใช้มาตราดังกล่าวมาจนกระทั่งถึงปัจจุบัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์

ขนาด	ความสัมพันธ์ของขนาดโดยประมาณกับความสั่นสะเทือนใกล้ศูนย์กลาง
1-2.9	เกิดการสั่นไหวเล็กน้อย ผู้คนเริ่มมีความรู้สึกถึงการสั่นไหว บางครั้ง รู้สึกเวียนศีรษะ
3-3.9	เกิดการสั่นไหวเล็กน้อย ผู้คนที่อยู่ในอาคารรู้สึกเหมือนรถไฟวิ่งผ่าน
4-4.9	เกิดการสั่นไหวปานกลาง ผู้ที่อาศัยอยู่ทั้งภายในอาคาร และนอกอาคาร รู้สึกถึงการ
5-5.9	เกิดการสั่นไหวรุนแรงเป็นบริเวณกว้าง เครื่องเรือน และวัตถุมีการเคลื่อนที่
6-6.9	เกิดการสั่นไหวรุนแรงมาก อาคารเริ่มเสียหาย พังทลาย
7.0 ขึ้นไป	เกิดการสั่นไหวร้ายแรง อาคาร สิ่งก่อสร้างมีความเสียหายอย่างมาก แผ่นดินแยก วัตถุที่อยู่

ความรุนแรงแผ่นดินไหว (Intensity)

ในปี ค.ศ. 1883 Guiseppe Mercalli ชาวเมืองแฮมิลตัน รัฐโอไฮโอ สหรัฐอเมริกา ได้เสนอมาตรวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นมาตราที่แสดงถึงความรุนแรงของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น วัดได้จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะเกิด และหลังเกิดแผ่นดินไหว เช่น ความรู้สึกของผู้คน ลักษณะที่วัตถุหรือ อาคารเสียหายหรือสภาพภูมิประเทศที่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น ในกรณีของประเทศไทยใช้ มาตรามอร์เคลลี สำหรับเปรียบเทียบอันดับความรุนแรง

มาตรามอร์เคลลี

มีทั้งหมด 12 อันดับ เรียงลำดับความรุนแรงแผ่นดินไหวจากน้อยไปมาก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตรามอร์เคลลี (Mercalli Scale)

อันดับที่	ลักษณะความรุนแรงโดยเปรียบเทียบ
I	เป็นอันดับที่อ่อนมาก ตรวจวัดโดยเครื่องมือ
II	พอรู้สึกได้สำหรับผู้ที่อยู่นิ่ง ๆ ในอาคารสูง ๆ
III	พอรู้สึกได้สำหรับผู้ในบ้าน แต่คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึก
IV	ผู้อยู่ในบ้านรู้สึกวามสั่นไหวในบ้านสั่นไหว
V	รู้สึกเกือบทุกคน ของในบ้านเริ่มแกว่งไกว
VI	รู้สึกได้กับทุกคนของหนักในบ้านเริ่มเคลื่อนไหว
VII	ทุกคนต่างตกใจ สิ่งก่อสร้างเริ่มปรากฏความเสียหาย
VIII	เสียหายค่อนข้างมากในอาคารธรรมดา

IX	สิ่งก่อสร้างที่ออกแบบไว้อย่างดี เสียหายมาก
X	อาคารพัง รางรถไฟบิดงอ
XI	อาคารสิ่งก่อสร้างพังทลายเกือบทั้งหมด ผิวโลกปูถนนและเลื่อนเป็นคลื่นบน พื้นดินอ่อน
XII	ทำลายหมดทุกอย่าง มองเห็นเป็นคลื่นบนแผ่นดิน

ทั้งนี้ เครื่องมือสำหรับวัดการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เรียกว่า “ไซสโมกราฟ” (Seismograph) แต่ในปัจจุบันใช้ทั้งระบบเครือข่ายสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวในระดับแต่ละประเทศและเครือข่ายในระดับโลกเพื่อการวิเคราะห์ตำแหน่ง ขนาด และเวลาเกิดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้อย่างรวดเร็ว

ประเทศไทยเริ่มมีการตรวจแผ่นดินไหวครั้งแรก เมื่อปี พ.ศ. 2506 (ค.ศ. 1963) สถานีตรวจแผ่นดินไหวแห่งแรกของกรมอุตุนิยมวิทยา ติดตั้ง ณ จังหวัดเชียงใหม่ โดยเข้าร่วมอยู่ในเครือข่ายระบบมาตรฐานโลก Worldwide Standardized Seismograph Network (WWSSN) และต่อมาปรับเปลี่ยนเป็นระบบเครือข่าย Incorporated Research Institution of Seismology (IRIS) ซึ่งเป็นเครือข่ายโดยความร่วมมือของสถาบันการศึกษาหลายแห่ง ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งบุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงข้อมูลได้โดยผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

สาเหตุของการเกิดสึนามิ

1) คลื่นสึนามิ ส่วนใหญ่เกิดจากการรบกวนโดยความสั่นสะเทือน (Seismic disturbances) ได้ทะเล เช่น แผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด หรือแม้แต่ดินถล่ม การขยับตัวของเปลือกโลกไป 2-3 เมตรระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวได้น้ำ นั้นก็สามารถครอบคลุมพื้นที่หลายหมื่นตารางกิโลเมตร และยังส่งถ่ายพลังงานศักย์มหาศาลไปสู่ น้ำที่ซ้อนทับอยู่ข้างบนได้อย่างฉับพลัน คลื่นสึนามิเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้น เนื่องจากแผ่นดินไหวได้น้ำส่วนมากไม่ได้หมายความว่า จะเกิดคลื่นสึนามิขึ้นทุกครั้งไป ดังเช่นแผ่นดินไหวที่บริเวณชายฝั่งด้านตะวันตกของเกาะสุมาตรา เมื่อวันที่ 28 มีนาคม ค.ศ. 2005 ซึ่งมีขนาด 8.7 ริคเตอร์ ก็ไม่มีคลื่นสึนามิเกิดขึ้นแต่อย่างใด ระหว่างปี ค.ศ.1861 ถึง ค.ศ. 1948 มีคลื่นสึนามิเกิดขึ้นเพียง 124 ครั้งจากแผ่นดินไหว 15,000 ครั้ง (คิดเป็นเพียง 0.826% เท่านั้น) การเกิดคลื่นสึนามิ เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ผลิตความถี่ต่ำ ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจสะท้อนถึงความจริงที่ว่า คลื่นสึนามิส่วนมากมีแอมพลิจูด (Amplitude) น้อย และมีขนาดเล็กจนสังเกตไม่เห็น หรือ แผ่นดินไหวส่วนมากที่ทำให้เกิดคลื่นสึนามินั้น อย่างน้อยที่สุดต้องเกิดแผ่นดินไหว ที่มีโฟกัส (Hypocenter) โดยมีขนาดที่ผิวหน้า (M_s) มากกว่า 6.5 ริคเตอร์ ขึ้นไป (เกณฑ์โอกาสเกิดคลื่นสึนามิของ USGS คือ 6.8 ริคเตอร์)

2) แผ่นดินไหวใต้ทะเลมีศักยภาพในการทำให้เกิดแผ่นดินถล่ม (landslides) ไปตามความชันของลาดทวีป (continental slope) ซึ่งอยู่ตามขอบฝั่งทะเลเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ ความลาดชันยังอยู่บนด้านข้างของหุบทะเล และรอบๆ ภูเขาไฟในมหาสมุทร ภูเขาทะเล (seamounts) เกาะปะการังที่อยู่ใต้น้ำและได้น้ำ (atolls & guyots) มากมาย เนื่องจากเราตรวจเหตุการณ์ดังกล่าวได้ยาก จึงถือได้ว่าแผ่นดินถล่ม เป็นสาเหตุส่วนน้อยของการทำให้เกิดคลื่นสึนามิ แผ่นดินเลื่อนหรือแม้แต่แผ่นดินถล่มเล็กๆ มากมายมีศักยภาพที่จะขยับที่มวลน้ำเป็นปริมาตรมหาศาล มีผู้เคยทำแผนที่การเลื่อนของพื้นทะเลที่มีปริมาตรของมวลสาร 20,000 กม³ มาแล้ว คลื่นสึนามิที่เกิดด้วยเหตุนี้มีขนาดใหญ่กว่าคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว

3) คลื่นสึนามิเกิดมาจากภูเขาไฟระเบิด มีหลักฐานว่าคลื่นสึนามิเพียง 92 ครั้ง เกิดจากภูเขาไฟระเบิด

4) มีบันทึกทางประวัติศาสตร์เพียงครั้งเดียวเกี่ยวกับคลื่นสึนามิ ที่เกิดจากการตกกระทบของอุกกาบาตที่มหาสมุทร นี่ไม่ใช่หมายความว่ามันเป็นสิ่งที่ไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ อุกาบาตเล็กๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 เมตร สามารถ

5) ปรากฏการณ์ทางอุณหภูมิมักทำให้เกิดคลื่นสึนามิขึ้นได้ คลื่นสึนามิพวกนี้มักเกิดแถวเขต Temperate ที่ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศ (Pressure Changes) ต่อเวลามีค่ามาก $\left(\frac{\Delta p}{\Delta t}\right)$ -- (1.3)

หรือการเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศมากในเวลาสั้นๆ เหตุการณ์พวกนี้มักเกิดในทะเลสาบและแอ่งน้ำขนาดใหญ่ ที่ซึ่งมี Resonance ของการเคลื่อนที่ของคลื่น

ตาราง ที่ 3 สาเหตุของการเกิดคลื่นสึนามิในบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกในรอบ 2,000 ปี

Cause	Number of Events	Percentages of Events	Number of Deaths	Percentages of Deaths
Landslide	65	4.6	14,661	3.2
Earthquake	1,171	82.3	390,929	84.5
Volcanic	65	4.6	51,643	11.2
Unknown	121	8.5	5,364	1.2
Total	1,422	100	462,597	100

(Source: National Geophysical Data Center and World Data Center A for Solid Earth Geophysics, 1998, and Intergovernmental Oceanographic Commission, 1999)

จากตารางที่ 3 เห็นได้ว่าสาเหตุของคลื่นสึนามิส่วนที่เป็นสาเหตุหลักนั้นคือ แผ่นดินไหว ซึ่งมีมากเป็นจำนวน 82.3 % ของการเกิดคลื่นสึนามิทั่วโลกและมีผู้เสียชีวิตมากถึง 84.5% และที่น่าสนใจอีกอย่างคือการเกิดคลื่นสึนามิจากแผ่นดินถล่มใต้ทะเล ซึ่งประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีโอกาสได้รับความเสียหายจากคลื่นสึนามิที่มีสาเหตุมาจากสิ่งนี้ โดยบริเวณที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดคือ แนวร่องลึกในทะเลอันดามัน ดังนั้นเราจึงไม่ควรตั้งอยู่บนความประมาท การเกิดคลื่นสึนามิจากบริเวณที่เป็นเหตุได้ทะเลโดยเฉพาะที่ทะเลอันดามันนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา และได้มีการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขประมวลผลเพื่อจำลองสถานการณ์แล้ว ซึ่งน่าเป็นห่วงมาก

การแจกแจงของสึนามิ

โดยปกติแล้วคลื่นสึนามิมักเกิดในบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในทะเล ตามแนววงแหวนไฟเท่านั้น อย่างไรก็ตามบริเวณอื่นๆ ที่ห่างไกลออกไปจากแนววงแหวนไฟก็สามารถเกิดคลื่นสึนามิได้เช่นเดียวกัน เช่นที่บริเวณทะเลเมดิเตอร์เรเนียน ทะเลแคริบเบียน เป็นต้น

ตาราง ที่ 4 เปอร์เซนต์ของการแจกแจงคลื่นสึนามิในทะเลและมหาสมุทรทั่วโลก (ที่มา : Bryant, 1991.)

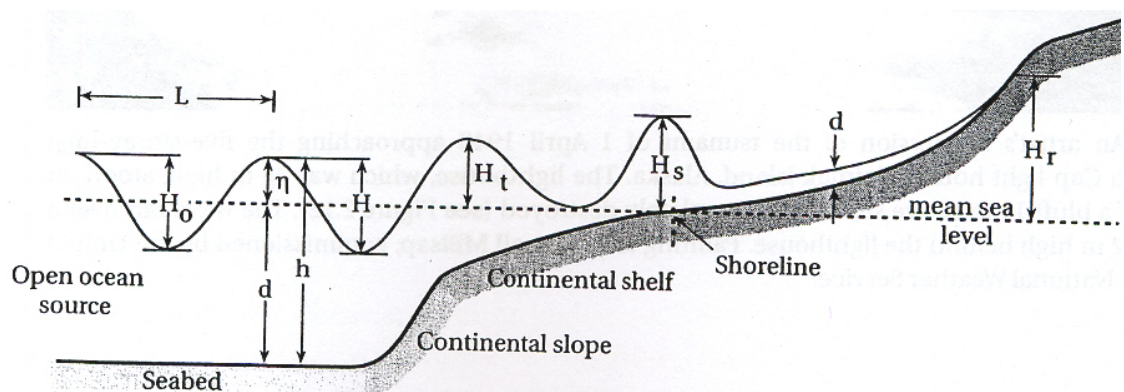
Location	Percentages
Atlantic Earth coast	1.6
Mediterranean	10.1
The Bay of Bengal	0.8
East Indies	20.3

Pacific Ocean	25.4
Japan - Russia	18.6
Pacific East Coast	8.9
Caribbean	13.8
Atlantic West Coast	0.4

พลศาสตร์ของคลื่นสึนามิ

การศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงกลไกการเกิดคลื่นสึนามิ สามารถช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรม ผลกระทบของคลื่นสึนามิ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผนเผชิญภัยได้

ลักษณะเฉพาะของคลื่นสึนามิ การเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหันของพื้นทะเลเพียงแค่ 2-3 เมตร จากพื้นระดับทะเลปานกลางระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว สามารถเลื่อนปริมาตรมหาศาลของมวลน้ำขึ้นได้อย่างฉับพลันเช่นกัน ดังนั้น จึงเป็นผลให้เกิดคลื่นสึนามิขึ้น คลื่นสึนามิทำลายล้าง (Destructive Tsunami) ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายไกลออกไปจากต้นกำเนิดมากๆ ได้ บางครั้งถูกเรียกว่า “Tele-tsunami” และส่วนมากน่าจะเกิดจากการเคลื่อนไหวในแนวดิ่งของพื้นทะเลมากกว่าการเคลื่อนไหวในแนวราบ



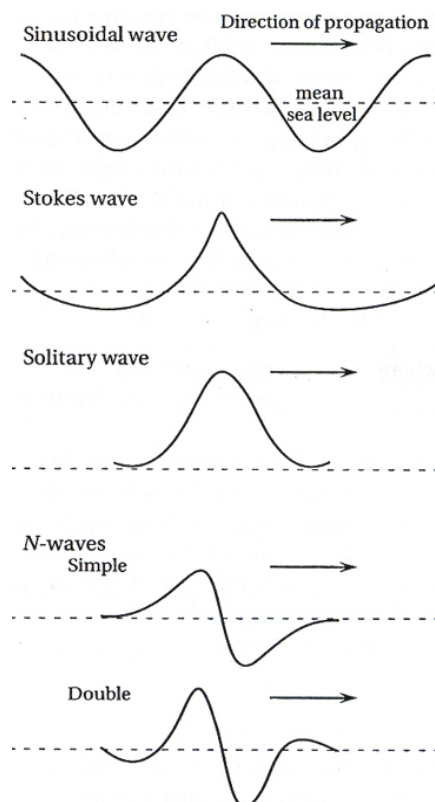
รูปที่ 7 เทอมต่างๆที่ใช้แสดงความสูงของคลื่นสึนามิ (ที่มา : Bryant, 1991.)

คลื่นสึนามิตามแบบฉบับมีคาบตั้งแต่ 100 ถึง 2000 วินาที (1.6 ถึง 33 นาที) เรียกว่าหน้าต่างคลื่นสึนามิ (Tsunami window)

คลื่นที่มีคาบดังกล่าว เดินทางด้วยความเร็ว

- 600 ถึง 900 กม/ชั่วโมง ในน้ำส่วนที่ลึกที่สุดของมหาสมุทร (Open Ocean)
- 100 ถึง 300 กม/ชั่วโมง ผ่านไหล่ทวีป (Continental Shelf) และ
- 36 กม/ชั่วโมง ที่ชายฝั่ง (Shore line)

ความยาวคลื่นสึนามิ (ระยะห่างระหว่างยอดคลื่นสองยอดต่อกันไป) อยู่ระหว่าง 10 ถึง 500 กม. คลื่นยาวเหล่านี้ ทำให้คลื่นสึนามิแตกต่างออกไปจากคลื่นเสวล (Swell) และคลื่นพายุซัดฝั่ง (Storm Surge)



รูปที่ 8 รูปตามอุดมคติของภาคตัดขวางของคลื่นสึนามิขนาดในแนวตั้งค่อนข้างมากเกินจริง (ที่มา: Bryant, 1991.)

ในน้ำลึก ปัจจัยที่สำคัญที่สุด คือ อัตราส่วนระหว่าง $H:L$ หรือความชัน (Slope) ของคลื่น ในน้ำตื้น คือ $H:d$ หรือ ความสูงสัมพัทธ์ คลื่นไซน์เข้ากับคลื่นประเภท Cnoidal waves

สำหรับคลื่นไซน์ พารามิเตอร์นี้เป็นศูนย์ ในขณะที่คลื่นสึนามิในมหาสมุทรเปิดมีรูปร่างอย่างประมาณเป็นรูป ไซน์ (Sinusoidal waves)

คลื่นสึนามิจะมียอดสูงขึ้น ขณะที่มันเดินทางผ่านไหล่ทวีป ในกรณีนี้ พารามิเตอร์ตัวเลขที่อธิบายรูปร่างมีค่า เพิ่มขึ้น และเทอม Nonlinear มีความสำคัญมากขึ้น ยอดคลื่นจะชันขึ้น ในขณะที่ท้องคลื่นจะราบลง คลื่นรูปร่างแบบนี้ อธิบายได้โดยทฤษฎีของ Stokes ซึ่งกล่าวว่า เราอธิบายการเคลื่อนไหว 2 มิติ ด้วยผลรวมขององค์ประกอบไซน์ 2 พวก ด้วยกัน (รูปที่ 8) อนุภาคน้ำในคลื่น Stokes ไม่เป็นวงโคจรปิด มันมีการเคลื่อนที่ของมวลน้ำทั่วคอลัมน์น้ำ ขณะที่คลื่นผ่าน จุดๆหนึ่ง

ขณะที่คลื่นสึนามิมาสู่ฝั่ง การแยกแยะหว่างยอดคลื่นยิ่งมากขึ้น จนทำให้ท้องคลื่นหายไป แล้วยังคงเหลือแค่ยอด สูงของคลื่นเพียงลูกเดียว พารามิเตอร์ตัวเลขที่แสดงลักษณะรูปร่างมีค่าใกล้ 1 แล้วคลื่นสึนามิกลายเป็น คลื่นชนิด solitary (รูปที่ 8) ซึ่ง *Solitary waves* เป็นแบบ translatory ในแบบที่ว่า น้ำเคลื่อนที่ไปตามยอดคลื่น รูปคลื่นทั้งหมดอยู่เหนือ ระดับน้ำทะเลปานกลาง ในที่สุด ท้องคลื่นซึ่งสูงเท่ากับยอดคลื่นและเดินทางนำหน้าขบวนคลื่นสึนามิมากมาย สิ่งนี้ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า กำแพงคลื่น (wall effect) หรือ bore (รูปที่ 9) คลื่นสึนามิเมื่อ 26 ธันวาคม ค.ศ. 2004 หลายลูก เป็นแบบนี้ โดยเฉพาะในบริเวณประเทศศรีลังกา และอินเดียซึ่งแนวกำแพงคลื่นจะเป็นคลื่นลูกแรกที่เข้าปะทะฝั่ง คลื่น เหล่านี้ไม่ได้เป็นแบบ solitary เนื่องจากมันมีองค์ประกอบตัวหนึ่งต่ำกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง รูปคลื่นแบบนี้มีลักษณะ เป็นรูป N (*N-waves*) ในประเทศไทยจากเครื่องวัดระดับน้ำอัตโนมัติของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือ และผู้สังเกตที่ชายฝั่ง มีผู้เห็นว่าน้ำทะเลถดถอยออกไปไกล (Drag down) ก่อนที่ยอดคลื่นจะมาถึง (รูปที่ 10) สิ่งนี้เกิดขึ้นได้เฉพาะเมื่อมีการ



รูปที่ 9 กำแพงคลื่นสึนามิ (Bore) ที่อำเภอวัง จ.กระบี่ เมื่อ 26 ธันวาคม ค.ศ. 2004
(ที่มา: อัสสรสุดา ศิริพงษ์, 2005)



รูปที่ 10 น้ำทะเลลดถอยที่หาดกะตะน้อย จ.ภูเก็ต เมื่อ 26 ธันวาคม ค.ศ. 2004
(ที่มา: อัสสรสุดา ศิริพงษ์, 2005)

สเปกตรัมของคลื่นสึนามิ

คลื่นสึนามิเป็นคลื่นยาว ซึ่งเดินทางด้วยความเร็วแบบคลื่นน้ำตื้น ตามแบบสมการ (1.4) ที่ความลึกของน้ำ 4,000 เมตร มันมีความเร็วที่กลางมหาสมุทร

$$C = \sqrt{gd} \quad \text{----- (1.4)}$$

$$C = \sqrt{9.815 \times 4000}$$

$$= 198.14 \text{ เมตร/วินาที}$$

โดยมี Energy density ซึ่งลดลงอย่างเป็นกำลังผกผันกับระยะทางที่มันเดินทาง

ความจริงแล้วเราสามารถคำนวณพลังงานของคลื่นสึนามิได้ ซึ่งทั่วไปแล้วขึ้นอยู่กับ 4 ปัจจัย นั่นคือ

1. การแผ่กระจายไปของคลื่นสึนามิจากแหล่งกำเนิด (Propagation)
2. ความลึกของมวลน้ำในบริเวณที่เป็นต้นกำเนิดคลื่นสึนามิ (Vertical displacement)

3. ขนาดของแผ่นดินไหวที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสึนามิ (Magnitude)

4. ช่วงเวลาสูงสุดก่อนที่คลื่นสึนามิจะมาถึงหลังจากการเกิดแผ่นดินไหว (Predominant period of a tsunami)

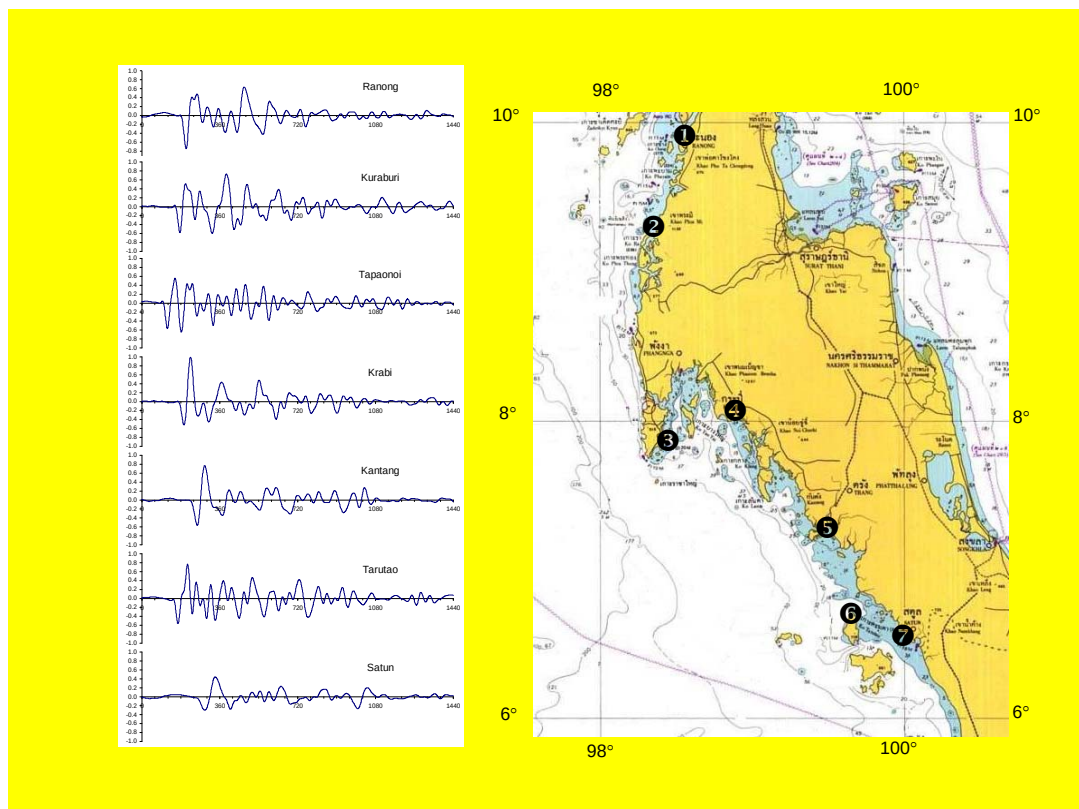
Takahasi, 1963 ได้อธิบายถึงการเกิดคลื่นสึนามิด้วยแผ่นดินไหวได้ทะเลในแนวตั้งว่า ส่วนที่ดันน้ำขึ้นจนเป็นคลื่นสึนามินั้น work done ที่กระทำต่อแรงกดดันน้ำข้างล่างสุด, $\rho g D$, นั่นคือ

$$E_1 = \rho g \sum_S b D d S \quad \text{---- (1.5)}$$

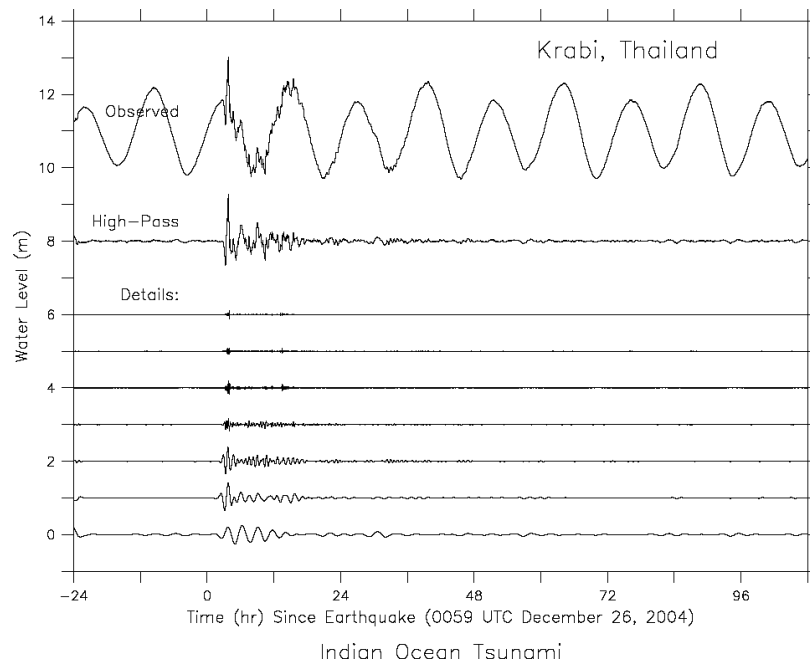
เมื่อ D คือ ความลึกพื้นได้น้ำบริเวณสถานีตรวจวัด

คลื่นสึนามิบางครั้งก็เป็นขอลคลื่นเดี่ยวๆ บางพวกก็มีท้องคลื่นกว้างๆนำไปข้างหน้าของตัวคลื่นหลัก และมีคลื่นลูกเล็กๆตามหลังมา (รูปที่ 11 และ 12)

ในทะเลลึก คลื่นสึนามิมีแอมพลิจูดน้อย บางครั้งสูงเพียง 50 เซนติเมตรเท่านั้น และความยาวคลื่นมาก เช่น 100 ถึง 200 กม ยกตัวอย่างเช่น ถ้าคลื่นสึนามิสูง 2 เมตรตอนกลางมหาสมุทรโดยใช้เวลา 15 นาที มันสามารถสูงขึ้นมาถึง 15 เมตรใกล้ฝั่ง



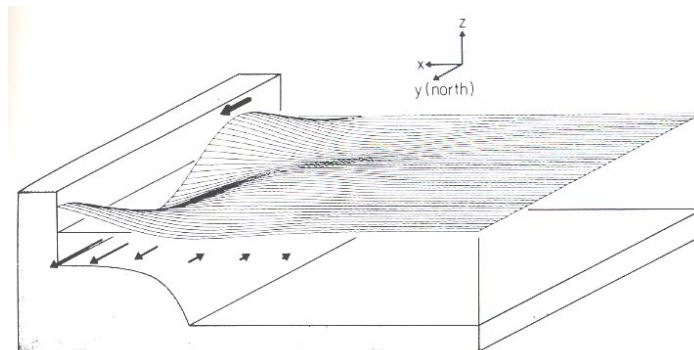
รูปที่ 11 กราฟน้ำจากเครื่องวัดระดับน้ำ 7 สถานีของไทย(ที่มา: อับสรสุตา ศิริพงศ์, 2005)



รูปที่ 12 การกรองเอาคาบน้ำขึ้นน้ำลงออกจากกราฟน้ำ แล้วแสดงด้วยความถี่ต่างๆ ที่กระเป๋ ช่วงเกิดสึนามิ ศูนย์คือเวลาที่เกิดแผ่นดินไหว (ที่มา: อัปสรสุดา ศิริพงศ์, 2005)

คลื่นขอบฝั่ง (Edge Waves)

คลื่นขอบฝั่งเป็นคลื่นผิวน้ำทะเลชนิดหนึ่ง ที่เดินทางขนานไปกับฝั่งทะเล โดยมียอดคลื่นตั้งฉากกับชายฝั่ง ความสูงของมันลดลงไปสู่ทะเล (รูปที่ 13) และหายไปทีระยะห่างของความยาวคลื่น 1 ลูกนอกชายฝั่ง มันมีความสำคัญในเรื่องพลศาสตร์ใกล้ชายฝั่งทะเล การเดินทางของมันถูกควบคุมโดยความลาดชันของชายหาด



รูปที่ 13 คลื่นขอบฝั่ง (Edge Wave) และ Non-Trapped Modes ของคลื่นสึนามิที่เกิดที่แหลม Mendocino เมื่อ 25 เมษายน 1992 (ที่มา: อัปสรสุดา ศิริพงศ์, 2005)

เรโซแนนซ์ (Resonance)

เนื่องจากคลื่นสึนามิมีคาบยาว ราว 100-2000 วินาที มันยังถูกกระตุ้นหรือมีความสูงเพิ่มขึ้นภายในท่าเรือและอ่าว ถ้าคาบคลื่นของมัน มีค่าประมาณฮาร์โมนิคบางตัวของความถี่ตามธรรมชาติ (Natural frequency) ของแอ่งน้ำ ซึ่งชื่อของคลื่นสึนามิในภาษาญี่ปุ่น ซึ่งหมายความว่า “คลื่นท่าเรือ” จึงเนื่องมาจากปรากฏการณ์นี้ ในท่าเรือ คลื่นสึนามิมีการแกว่งไกว

$$\text{อ่าวปิด:} \quad T_s = 2L_b (gd)^{-0.5} \quad (1.6)$$

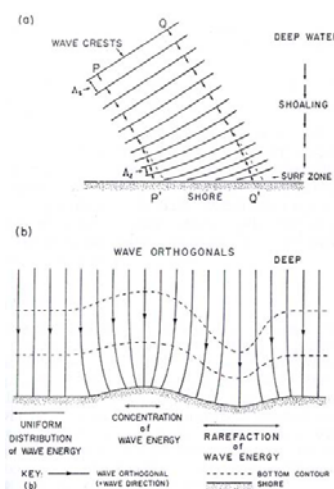
$$\text{อ่าวเปิด:} \quad T_s = 4L_b (gd)^{-0.5} \quad (1.7)$$

เมื่อ T_s = คาบคลื่นซีช (seiches) ในอ่าว แอ่งน้ำ หรือท่าเรือ (วินาที)
 L_b = ความยาวของแอ่งน้ำหรือท่าเรือ (เมตร)

สมการ (1.6) เหมาะกับแอ่งน้ำปิด หรือทะเลสาบ และมีชื่อว่า Merian's Formula ในกรณีนี้ กลไกแรงที่มากระทำไม่มีการเชื่อมโยงกับมหาสมุทร ยกตัวอย่างเช่นสระว่ายน้ำขนาดโอลิมปิกยาว 50 เมตร ลึก 2 เมตร จะมีคาบเรโซแนนซ์ตามธรรมชาติ 22 วินาที การแกว่งไกวใดๆที่มีคาบ 5.5, 11 และ 22 วินาที สามารถเหนี่ยวนำน้ำให้เคลื่อนไหวไปข้างหน้าและข้างหลังไปตามความยาวของสระน้ำได้ ปรากฏการณ์นี้ทำให้คลื่นในอ่าวหรือท่าเรือเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งนำมาอธิบายในกรณีของคลื่นสึนามิที่สูงมากในอ่าวบางแห่ง

ผลของความตื้นของพื้นทะเล (Shoaling Effect)

เมื่อคลื่นสึนามิเดินทางมาใกล้ฝั่ง มันจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากภูมิประเทศของพื้นและฝั่งทะเล มันจึงมีการหักเห (Refraction) รูปที่ 14 สะท้อน และ เลี้ยวเบน (Diffraction) เกิดขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์พวกนี้ทำให้คลื่นสึนามิ ซึ่งเป็นคลื่นยาวมากมีการเลี้ยวเป็นวง (wrap up) เช่นบริเวณเกาะ หรือแหลม เช่น ที่เกาะพีพี เกาะพระทอง จะเห็นปรากฏการณ์นี้ โดยที่มีคลื่นสูงเกิดขึ้นในบริเวณที่หลังเกาะ ซึ่งจะแตกต่างกับคลื่นลม เมื่อมีลมแรงทำให้เกิดคลื่น คลื่นจะแรงเฉพาะด้านที่รับคลื่นลมเท่านั้น นอกจากนี้ การถดถอยอย่างรุนแรงออกสู่ทะเลที่พาเอาเศษขยะต่างๆมาด้วย ทำให้คลื่นสึนามิมีพลังการกัดเซาะสูงมาก บางแห่ง เช่นที่หาดบางเทา หาดป่าตอง การกัดเซาะจากคลื่นถดถอย (backwash) มีมากกว่าคลื่นโถมกระแทก (up rush) เสียอีก



รูปที่ 14 การหักเหของคลื่นเมื่อเข้ามาสู่ชายหาด

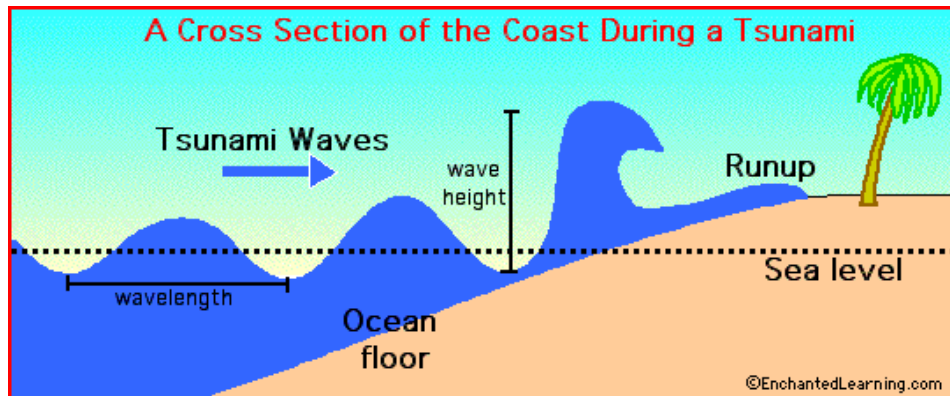
(a) ที่พื้นดินอย่างราบเรียบ (b) พื้นที่มีสันเขา (ชาย) และร่องลึก (खा)

เส้นประคือคอนทัวร์ความลึก เส้นทึบเป็นOrthogonalของคลื่น (ทิศทางที่คลื่นเดินทาง)

(ที่มา: อัสสรสุตา ศิริพงษ์, 2005)

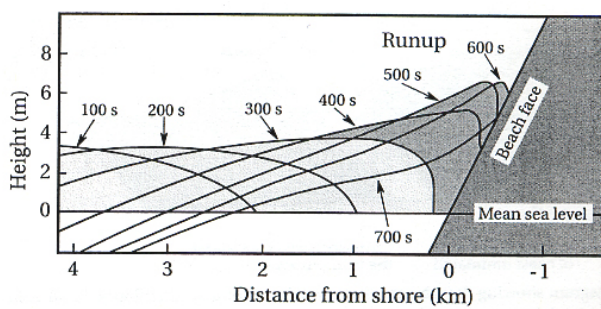
การซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ (Tsunami Runup)

คลื่นสึนามิมีลักษณะที่แตกต่างจากคลื่นลมอีกอย่างคือมันมีความสูงของการซัดขึ้นไปในแผ่นดิน มากจนน่าแปลกใจ โดยทั่วไปแล้วการซัดขึ้นไปในแผ่นดินจะสูงกว่าคลื่นสึนามิที่มากกระแทกฝั่งทะเลพอดี (รูป 15 และ 16) ตามปกติคลื่นลมจะแตก (Break) และสลายพลังงานใน surf zone แต่คลื่นสึนามิอาจไม่แตก มันจึงพาเอาพลังงานมหาศาลมาทำลายฝั่งได้อย่างรุนแรงอย่างคาดไม่ถึง



รูปที่ 15 คลื่นสึนามิเมื่อมาใกล้ฝั่ง

(ที่มา : <http://www.enhantedlearning.com/subject/tsunami/label/hittingcoast/>)

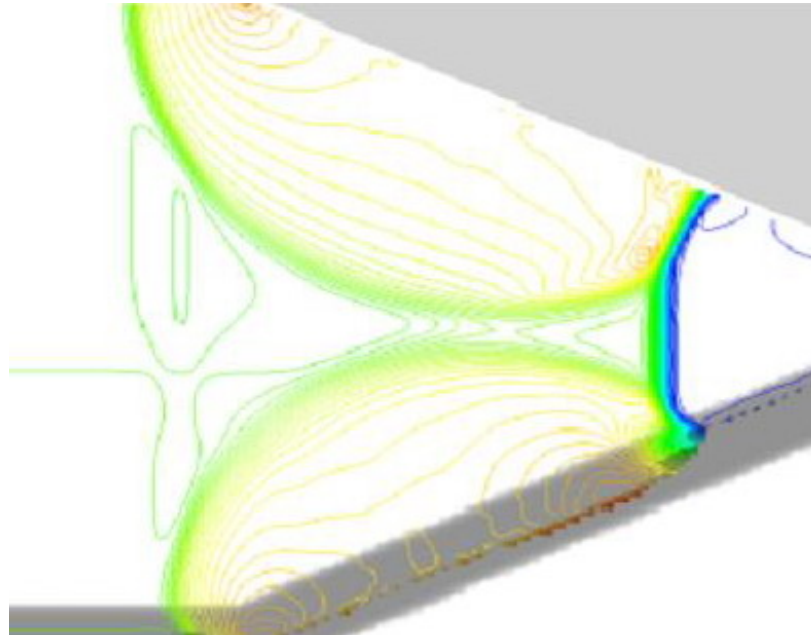


รูปที่ 16 แบบจำลองการซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิบนชายหาด โดยใช้สมการคลื่นยาวในน้ำตื้น

(ที่มา: Bryant, 1991.)

ความสูงของการซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิยังขึ้นกับ รูปร่างของชายฝั่งทะเล การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) การเรโซแนนซ์ของคลื่นสะท้อน การเกิดคลื่นขอบฝั่ง ที่เดินทางตั้งฉากกับชายฝั่ง การดัก (trapping) ของพลังงานที่ตกกระทบโดยการหักเหของคลื่นสะท้อนจากฝั่งทะเล และการเกิดคลื่น **Mach-Stem** จะสูงกว่าคลื่นปกติ ที่มากกระแทกโครงสร้างด้วยมุมเอียง (รูปที่ 17) จึงควรระมัดระวังในการก่อสร้างต่างๆ เช่น กำแพงกันคลื่น เพราะอาจทำให้เกิดอันตรายมากได้

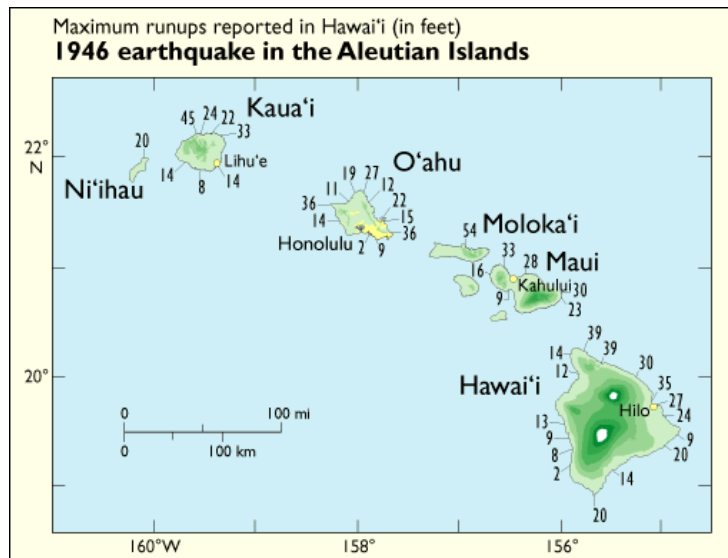
คลื่น **Mach-Stem** ยังไม่เป็นที่เข้าใจกันดีในพลศาสตร์ของฝั่งทะเล มันมาจากการศึกษาพลศาสตร์ของการไหลไปตามขอบปีกเครื่องบิน ที่ซึ่งพลังงานมาสะสมตรงขอบเขตระหว่างปีกและการไหลของอากาศที่ผ่านมันไป ในบริเวณใกล้ฝั่ง หรือ



รูปที่ 17 การสะท้อนของคลื่น Mach ลูกเหี้ยวที่กำลังแผ่กระจาย เส้นความสูงเท่า (Contour) ของความสูงของคลื่นเหนือค่าตั้ง (Datum) (ที่มา: อัปสรสุดา ศิริพงษ์, 2005)

ถึงคลื่นสึนามิซึ่งสูงเพียง 10 เมตร แต่สามารถท่วมท้นหน้าผาที่สูง 30 เมตรหรือมากกว่านั้นได้ นอกจากนี้ คลื่น Mach-Stem ยังมีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดววน (vortices) ความเร็วสูง ที่กัดเซาะหินดานโดยคลื่นสึนามิขนาดใหญ่

กระบวนการต่างๆเหล่านี้ ชกเว้น คลื่น Mach-Stem จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฝั่งทะเล หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ารูปร่างของชายฝั่งนั้น มีผลโดยตรงต่อความสูงของคลื่นสึนามิ การแปรผันนี้ทำให้ความสูงของคลื่นสึนามิแปรผันไปตามที่ต่างๆในระยะทางที่ไม่ห่างไกลออกไป ในอ่าวบางแห่ง มันทำให้คลื่น 2-3 ลูกรวมกันเป็นคลื่นสึนามิสูงโด่ง แต่บางแห่งก็ไม่สูงมากนัก รูปที่ 18 เป็นแผนที่ของคลื่น Run-up รอบฮาไว เมื่อมีแผ่นดินไหวที่อาลาสกา เมื่อ 1 เมษายน 1946 ฝั่งทะเลด้านเหนือรับคลื่นสึนามิ มีการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินสูงสุด คลื่นมาห่อหุ้ม (wrap around) รอบเกาะ ทำให้ มีการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดิน สูงกว่าตรงด้านที่ถูกกำบัง โดยเฉพาะที่เกาะ Kauai และฮาไว เนื่องจากการหักเห ส่วนที่เป็นแหลม ก็มี มีการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินสูง ฝั่งทะเลที่สูงชันจะถูกคลื่นสึนามิโจมตีแรงที่สุด เนื่องจากคลื่นมาถึงฝั่งโดยการสูญเสียพลังงานไประหว่างเดินทางน้อยที่สุด



รูปที่ 18 ความสูงของการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดิน รอบเกาะฮาไว(Hawaii)

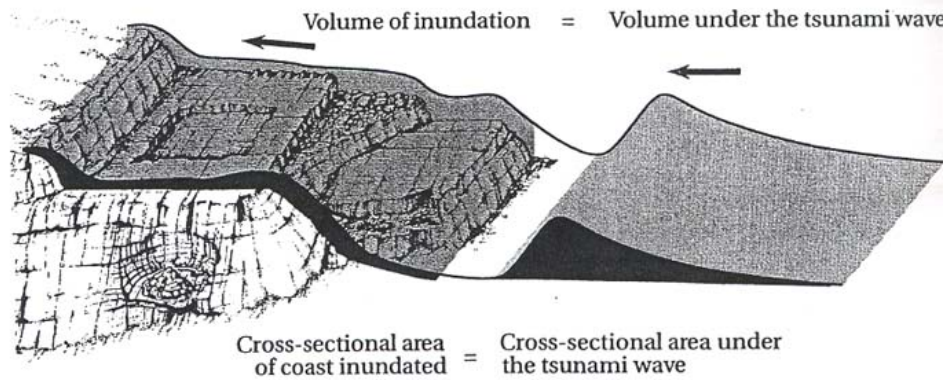
จากแผ่นดินไหวที่อลาสกา เมื่อ 1 เมษายน ค.ศ. 1946 (ที่มา : <http://www.tsunami.org/map46.htm>)

ส่วนที่ถูกกำบังด้านหลังเกาะก็เผชิญกับการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ คลื่น Solitary เดินทางไปค่อนข้างง่ายตามชายฝั่งที่ชัน เกิดเป็นคลื่นขอบฝั่ง แบบจำลองในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า ความสูงมากที่สุดของคลื่น Run-up ของคลื่นกับค่ามากที่สุดตรงด้านหลังของเกาะ นอกจากนี้ ความเร็วของมัน ณ ที่นี้อาจเร็วกว่า 3 เท่าตรงด้านหน้าเกาะ

คลื่นที่มีการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดิน จากคลื่นสึนามิมีรูปร่างซับซ้อนมาก ส่วนมากจะสลายตัวเป็นกำแพง (Bore) หนึ่งลูกหรือมากกว่า กำแพงคลื่นเป็นรูปคลื่น (waveform) ชนิดหนึ่ง ที่มวลของน้ำเดินทางแผ่ออกไปสู่ฝั่ง (Propagation) พร้อมกับคลื่น ริมด้านหน้าของคลื่นบ่อยครั้งปั่นป่วน (turbulence) คลื่นในน้ำตื้นมากจะแตกเป็นกำแพงคลื่นหลายลูกหรือ solitons กำแพงคลื่นสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วโดยความปั่นป่วนและการเสียดทาน อย่างไรก็ตาม กำแพงคลื่นสึนามิสามารถทำความเสียหายอย่างมาก ขณะที่มันมาถึงฝั่ง การวิเคราะห์อย่างละเอียดแสดงว่ากำแพงคลื่นผลัดน้ำรูปสามเหลี่ยม (wedge-shaped water body) เล็กๆ ในทิศไปสู่ฝั่ง ขณะที่มันมาถึงฝั่ง มันจึงโยกย้ายโมเมนตัม (Momentum) ไปสู่ลึมน้ำ ทำให้ความเร็วและความปั่นป่วนของน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในขณะที่มันลดความเร็วยังลึกเข้าไปในแผ่นดิน สิ่งของที่อยู่ในความปั่นป่วนจะมีแรงกระแทกมากกว่าแรงที่เกิดจากคลื่นปกติ บ่อยครั้งที่เดียวที่วัตุกรรมมาเมื่อเดินทางไปเร็วมากจนมันกลายเป็นจิปนาฐในน้ำทำความเสียหายได้มากต่อชีวิตและทรัพย์สิน กระบวนการนี้สามารถวาดภาพเอาตะกอนมหาศาลบนชายหาดซัดลึกเข้าไปในแผ่นดิน ดังนั้น คลื่นสึนามิที่สลายเป็นกำแพงคลื่น จึงมีประสิทธิภาพในการกวาดเศษซากต่างๆ จากฝั่งทะเลลงสู่ทะเลได้อย่างง่ายดาย

น้ำท่วมลึกเข้าไปในแผ่นดิน (Inundation)

พื้นที่ภาคตัดขวางของฝั่งทะเลที่มีน้ำท่วมโดยคลื่นสึนามิ เท่ากับพื้นที่ภาคตัดขวางของน้ำภายใต้ยอดคลื่นใกล้ฝั่ง รูปที่ 19 คลื่นสึนามิยังมีขนาดใหญ่ หรือมีคาบยาวสั้นใด ปริมาตรของน้ำที่ถูกพามาสู่ฝั่งก็ยิ่งมาก และอาณาบริเวณที่น้ำท่วมก็ยิ่งแผ่ออกไปมากเช่นกัน



รูปที่ 19 พื้นที่ภาคตัดขวางของฝั่งทะเลที่ถูกน้ำท่วม และปริมาตรของน้ำท่วมโดยคลื่นสึนามิ
เท่ากับพื้นที่ภาคตัดขวางและปริมาตรของน้ำใต้ยอดคลื่นสึนามิ
(ที่มา: อัปสรสุดา สิริพงษ์, 2005)

การคำนวณระยะทางมากที่สุดที่ Run-up แผ่ซัดเข้าไปได้บนแผ่นดิน

จากสมการ

$$X_{\max} = (H_s)^{1.33} n^{-2} K \quad (1.8)$$

เมื่อ $X_{\max}$ = ขอบเขตระยะทางมากที่สุดที่น้ำท่วมลึกเข้าไปในแผ่นดิน (เมตร)

K = ค่าคงที่ = 0.06 H_s = ความสูงของคลื่นบริเวณชายฝั่ง (เมตร)

พื้นดินราบเรียบ เช่นหาดเลนหรือทุ่งหญ้ามีค่า $n = 0.0015$ พื้นที่ซึ่งมีตึก บ้านเรือนปกคลุม มีค่า 0.03 และป่าไม้หรือต้นไม้ทึบ มีค่า 0.07 รูปที่ 20 มีการหาค่าคงที่ในสมการ (1.8) สำหรับคลื่นสึนามิหลายลูก ได้ค่า 0.06 เมื่อใช้ค่านี้ ก็คำนวณค่าขอบเขตลึกที่สุดที่น้ำท่วม แล้วนำมาพล็อตในรูปแบบกราฟ

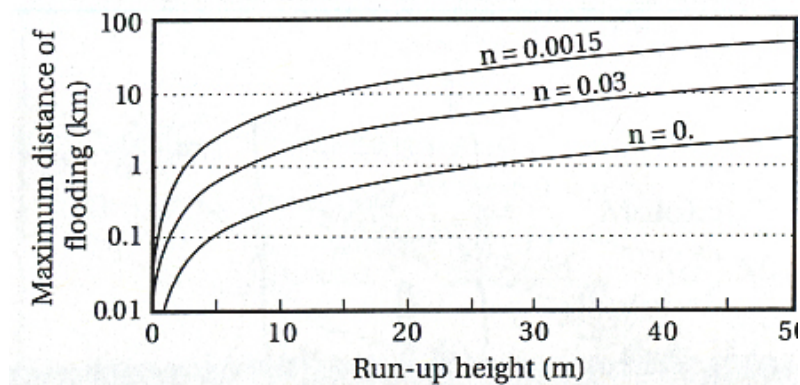
สำหรับการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ ต่างๆ พบว่า สำหรับพื้นที่ที่มีการพัฒนามานที่ราบฝั่งทะเล ซึ่งจากการประมวลผล”ข”ใช้แบบจำลองคลื่นสึนามิสูง 10 เมตร น้ำจะท่วมลึกเข้าไปถึง 1.4 กม. คลื่นสึนามิที่หายากสูง 40-50 เมตรทำให้น้ำท่วมลึก 9-12 กม. สำหรับพื้นที่เกษตรโล่ง คลื่นจะทำให้ น้ำท่วมลึกเข้าไปไกลกว่าถึง 4 เท่า คือ 5.8 กม. สำหรับคลื่นสึนามิสูง 10 เมตร และ 36-49 กม. สำหรับคลื่นสึนามิสูง 40-50 เมตร จากการคำนวณโดยใช้สมการ (1.8) ยังแสดงให้เห็นด้วยว่าผลของคลื่นสึนามิจะลดน้อยลงมากบนฝั่งทะเลราบเมื่อผ่านบริเวณพื้นที่ที่มีการปลูกต้นไม้ให้ทึบๆ ตัวอย่างเช่น คลื่นสึนามิสูง 10 เมตร จะท่วมลึกเข้าไปในแผ่นดินผ่านป่าไม้บนที่ราบชายฝั่งเพียง 260 เมตรเท่านั้นนับว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณหาดเลนหรือทุ่งหญ้าโล่ง และคลื่นสึนามิสูง 40-50 เมตรไม่สามารถผ่านป่าไม้ไปไกลกว่า 2.3 กม ดังตาราง ที่ 4 แสดงสหสัมพันธ์ของการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดิน(Run-up) ที่ความสูงคลื่นสึนามิต่างๆและลักษณะของพื้นที่ชายฝั่ง

ในกรณีชายทะเลภาคใต้ฝั่งตะวันตก ของประเทศไทย ป่าชายเลน ป่าสน จะช่วยมาก อุทยานแห่งชาติเขาหลัก-ลำรู่ที่มีแนวสนทึบหน้าชายหาด จะเห็นความเสียหายน้อยกว่าอุทยานแห่งชาติสิรินาถ ซึ่งมีต้นสนและต้นไม้อื่นๆขึ้นอยู่ห่างๆ

เราสามารถทำให้สมการ (1.8) ง่ายขึ้น

$$X_{\max} = 1000(0.5H_0)^{1.33} \quad (1.9)$$

สมการนี้สมมติว่าความสูงของ Run-up เป็น 10 เท่าของความสูงของคลื่นในมหาสมุทรเปิด และ Manning's ค่า n จะมีค่า 0.03 คลื่นสึนามิ ที่เกิดจากแผ่นดินไหวส่วนมากสูงไม่เกิน 1 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางในมหาสมุทร



รูปที่ 20 ความสูงของการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ กับขอบเขตที่น้ำท่วมถึงบนฝั่งทะเลที่ราบ (Coastal plain) ที่มีความขรุขระต่างกัน แสดงความขรุขระโดยค่า Manning's (n) ค่า 0.0015 พื้นเรียบมาก 0.03 แผ่นดินที่มีการพัฒนา และ 0.07 พื้นดินที่มีต้นไม้ทึบ (ที่มา: Bryant, 1991.)

ความลึกและความเร็วที่บนฝั่งทะเล

สมการ $V = \sqrt{gd}$ แสดงให้เห็นว่าความเร็วของคลื่นสึนามิขึ้นกับความลึกของน้ำ เมื่อคลื่นสึนามิมาถึงพื้นดิน แห้ง เราใช้สมการ

$$H_s = d \quad (1.10)$$

$$v_r = 2(gH_s)^{0.5} \quad (1.11)$$

เมื่อ v_r = ความเร็วของ run-up (เมตร/วินาที)

สมการจะให้ความเร็วของคลื่นสึนามิสูง 2 เมตรเป็น 8-9 เมตร/วินาที ที่ชายฝั่ง เราสามารถรวมความลาดชันและความขรุขระของฝั่งเข้าไปในสมการ ดังนี้

$$v_r = H_s^{0.7} [\tan(\beta_w)]^{0.5} n^{-1} \quad (1.12)$$

เมื่อ β_w = ความลาดชันของผิวน้ำ (องศา)

การวัดการเอียงของผิวน้ำทำได้ยาก แต่เราสามารถหามันได้จากการวัดแนวน้ำที่ติดอยู่ข้างตึก ต้นไม้ และขยะที่ตกลงอยู่บนพืช การวัดนี้จึงต้องกระทำอย่างรวดเร็วหลังการเกิดคลื่นสึนามิ มิฉะนั้นเมื่อมีการชำระล้างทำความสะอาดหรือเคลียร์พื้นที่ เราก็จะไม่มีข้อมูล สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยนี้มีการสำรวจการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิอย่างละเอียดโดยทีมงานของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญจาก USGS ซึ่งได้รับลงพื้นที่ทันทีหลังจากคลื่นสึนามิสงบลงไม่กี่วัน จึงสามารถนำมาคำนวณความเร็วและความลึกของการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิได้ ณ แนวที่วัด โดยทั่วไปการเอียงของผิวน้ำอยู่ระหว่าง 0.001 และ 0.0025 องศา เพิ่มขึ้นเมื่อ slope ชันขึ้น

ความเร็วของคลื่นสึนามิจากสมการ (1.11) และ (1.12) ทำให้คลื่นสึนามิ สามารถกัดเซาะหินดานและเคลื่อนย้ายตะกอน ทำให้เปลี่ยนแปลงลักษณะของฝั่งทะเลได้เป็นอย่างมาก ซึ่งเราได้ทำการศึกษาโดยละเอียดบริเวณ 6 จังหวัดของไทย

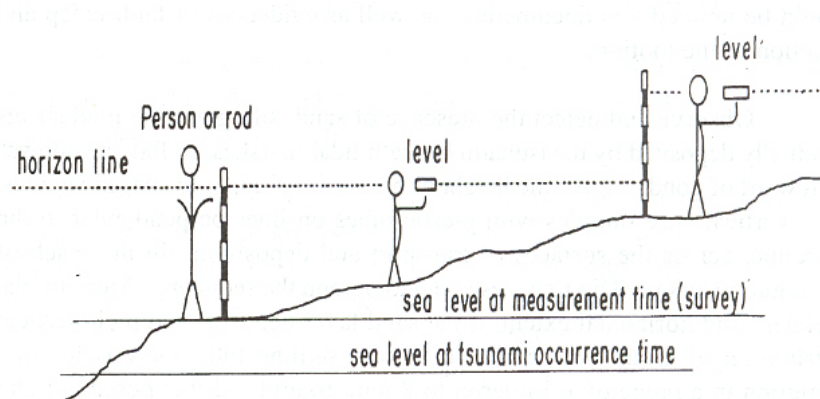
การวัดการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ

Intergovernmental Oceanographic commission (IOC), (IOC, 1998) ได้กำหนดมาตรฐานการวัดไว้และในการศึกษานี้ก็ยึดตามมาตรฐานดังกล่าว ดังนี้

1 การเลือกสถานที่สำรวจ ควรเลือกสถานที่เฉพาะ เช่น อ่าวเล็กๆ แนวชายฝั่งทะเลเปิด บริเวณเอสบูรี ชายหาด หรือบริเวณที่เหมาะสม เพื่อบันทึกหลักฐาน และประวัติของคลื่นสึนามิทั้งหมด และควรถ่ายภาพสถานที่นั้นๆด้วยเพื่อประกอบการวิเคราะห์ว่า ทำไมคลื่นสึนามิบริเวณนั้นจึงเป็นเช่นนั้น

2 ข่าวนับสนุน ก่อนเดินทางไปสำรวจ ควรจัดเตรียมข้อมูลสนับสนุน เช่น แผนที่ ภาพถ่ายทางอากาศ ข่าวกจากสื่อมวลชนต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเกิดคลื่นสึนามิ

3 วิธีการวัด ควรวัดอย่างง่ายและรวดเร็ว ตามรูปที่ 21



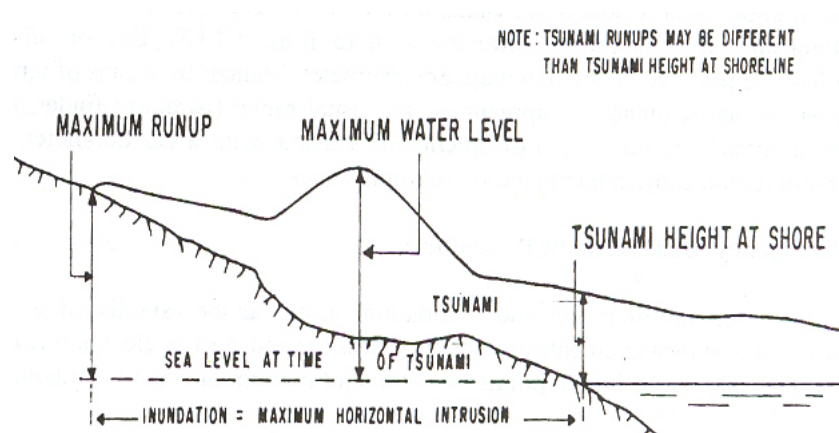
รูปที่ 21 วิธีการวัดความสูงของคลื่นสึนามิ (ที่มา: อัสสุรสุดา ศิริพงษ์, 2005)

ในการวัดเราควรแสดงความละเอียดถูกต้องของการวัดไว้เสมอ(Degree or Precision) ควรมีการวัด Horizontal positioning โดยเทียบกับ GPS ไว้ด้วย เปรียบเทียบค่าจากสถานีกับที่สถานี GPS ซึ่งในการวัดเราควรระบุสิ่งนี้ไว้ด้วย นั่นคือ

1. Reference Datum และ Tidal Correction เช่น ระดับน้ำทะเลปานกลาง ความสูงของ Run up เราควรปรับแก้ โดยเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง เวลาควรใช้เวลามาตรฐานสากล (UTC)

2. Bench Mark (หมุดระดับ) ตรวจสอบหาหมุดระดับที่ใกล้เคียงกับสถานที่ ที่สำรวจและใช้เป็นค่าเทียบมาตรฐาน และระดับสูงต่ำ โดยตรวจสอบกับ GPS

3. Run up เป็นการวัดในแนวขวางระหว่างแนวน้ำที่คลื่นสึนามิซัดลึกเข้าไปในแผ่นดินมากที่สุด บางที ระดับน้ำสูงสุดกับการแผ่ซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิสูงสุดอาจเป็นค่าเดียวกัน



รูปที่ 22 ระดับน้ำสูงสุดที่คลื่นสึนามิซัดลึกเข้าไปในแผ่นดินมากที่สุด

(ที่มา: อัสสุรสุดา ศิริพงษ์, 2005)

การวิเคราะห์ลักษณะการเกิดคลื่นสึนามิจากลักษณะการเกิดแผ่นดินไหว

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าคลื่นสึนามิ ที่เกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม ค.ศ. 2004 นั้นเป็นผลต่อเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ ที่บริเวณใกล้เกาะสุมาตราประเทศอินโดนีเซีย ที่มีขนาด (Mw) ถึง 9.3 ตามมาตราริกเตอร์ ปรากฏการณ์แผ่นดินไหว เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติชนิดหนึ่งที่พื้นดินมีการสั่นไหวด้วยอิทธิพลของของเหลวที่อยู่ใต้ผิวโลก ซึ่งเมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ คลื่นใต้แผ่นดินจะพุ่งไปสู่บริเวณทุกส่วนของโลก และถ้าการสั่นไหวของแผ่นดินรุนแรง อุปกรณ์ตรวจจับคลื่นที่อยู่ห่างไกลออก เช่น เครื่อง Very Broadband Seismometer ไปนับหมื่นกิโลเมตรก็จะสามารถรับคลื่นแผ่นดินไหวได้ การเกิดแผ่นดินไหวได้ทะเล สามารถส่งถ่ายพลังงานให้แก่มวลน้ำที่อยู่ด้านบนได้โดยตรงและรวดเร็ว จนก่อให้เกิดคลื่นสึนามิที่มีพลังงานมหาศาล แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับลักษณะการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกด้วยเช่นกัน เพราะขนาดของแผ่นดินไหว ไม่ได้เป็นดัชนีชี้ว่า ต้องเกิดคลื่นสึนามิทุกครั้งไป ดังตาราง

ตารางที่ 5 การเกิดแผ่นดินไหวครั้งสำคัญบริเวณใกล้ประเทศไทยที่มีโอกาสก่อให้เกิดคลื่นสึนามิ
ตั้งแต่ 26 ธ.ค. 2004 - 30 มิ.ย. 06

Date	Region	Magnitude	Tsunami
26 Dec 2004	Northern Sumatra, Indonesia	9.3	Yes
1 Jan 2005	West Coast of N-Sumatra	6.6	No
19 Feb 2005	Sulawesi, Indonesia	6.5	No
26 Feb 2005	Simeulue, Indonesia	6.8	No
2 Mar 2005	Banda Sea, Indonesia	7.1	No
28 Mar 2005	Northern Sumatra, Indonesia	8.6	No
14 May 2005	Nias Region, Indonesia	6.8	No
19 May 2005	Nias Region, Indonesia	6.9	No
24 July 2005	Nicobar Island, India	7.3	No
14 Mar 2006	Seram, Indonesia	6.7	No
16 May 2006	Nias Region, Indonesia	6.8	No
26 May 2006	Java, Indonesia	6.3	No
17 July 2006	South of Java, Indonesia	7.7	Yes

จากตารางที่ 5 มีการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่มากกว่า 7.0 ริคเตอร์ 5 ครั้ง โดยเกิดคลื่นสึนามิในวันที่ 26 ธันวาคม ค.ศ. 2004 จากขนาดแผ่นดินไหว 9.3 ริคเตอร์ 1 ครั้ง และ วันที่ 17 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 เกิดคลื่นสึนามิอีก 1 ครั้ง โดยมีแผ่นดินไหวเพียง 7.7 ริคเตอร์ ในขณะที่ เมื่อวันที่ 28 มีนาคม ค.ศ. 2005 แผ่นดินไหวที่หมู่เกาะนิโคบาร์ ประเทศอินเดีย มีขนาดใหญ่มากถึง 8.6 ริคเตอร์ กลับไม่มีคลื่นสึนามิเกิดขึ้น

ดังนั้นขนาดของคลื่นสึนามิ ไม่ได้กำหนดการเกิดคลื่นสึนามิ แต่ลักษณะการเกิดแผ่นดินไหวจะเป็นปัจจัยหลักในการกำเนิดคลื่นสึนามิ ซึ่งการเกิดแผ่นดินไหว ในลักษณะเลื่อนตามแนวราบ ถึงแม้จะมีพลังงานมหาศาล แต่การส่งถ่ายพลังงานสู่มวลน้ำโดยตรง ไม่ทำให้น้ำเกิดการกระเพื่อมมากพอที่จะทำให้เกิดคลื่นสึนามิได้ ซึ่งจะแตกต่างกับการเกิดแผ่นดินไหวในลักษณะ การเคลื่อนของแผ่นเปลือกโลกในลักษณะแนวตั้ง

อย่างไรก็ตามแม้จะมีพลังงานจากการเกิดแผ่นดินไหวมากมายเพียงใด แต่คลื่นสึนามิก็ไม่สามารถ ดูคลื่นมาได้ทั้งหมด แต่ก็มีพลังงานมหาศาลเพียงพอที่จะทำให้หลายสิ่งต่างๆ ได้อย่าไม่ยากเย็นนัก ซึ่งสามารถเปรียบเทียบพลังงานจากแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิได้ดังต่อไปนี้

การเปรียบเทียบระหว่างพลังงานจากคลื่นสึนามิ และจากแผ่นดินไหว

Iida (1963b) ให้ความสัมพันธ์ระหว่างแมกนิจูดของแผ่นดินไหวสัมพันธ์กับของคลื่นสึนามิไว้ ดังนี้

$$m = (2.61 \pm 0.22)M - (18.44 \pm 0.52) \quad (2.1)$$

Gutenberg และ Richter (1956) ให้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด แมกนิจูด กับพลังงานแผ่นดินไหว คือ E_s (มีหน่วยเป็น ergs) ดังนี้

$$\log E_s = 11.8 + 1.5M \quad (2.2)$$

จากทั้งสองสมการเราสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\log E_s = 22.4 + 0.6m \quad (2.3)$$

$$\text{หรือ} \quad E_s = E_0 \times 10^{0.6m} \quad (2.4)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad E_0 = 2.5 \times 10^{22} \text{ ergs} \quad (2.5)$$

Takahasi (1951) ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง แมกนิจูดของสึนามิกับพลังงานของคลื่นสึนามิ E_t : ดังนี้

$$E_t = E'_0 \times 10^{0.6m} \quad (2.6)$$

$$\text{ซึ่งค่า} \quad E'_0 = 2.5 \times 10^{21} \text{ ergs} \quad (2.7)$$

วิธีการของ Takahasi นี้พลังงานของคลื่นสึนามิสามารถประมาณได้จากสมการของ Sretenskiy (1941) และปรับปรุงโดย Miles (1968) นั่นคือ

$$p_{E_0} = \pi \rho g \int_0^\infty \eta_0^2(r) r dr \quad (2.8)$$

$$\text{จะได้} \quad \text{สมการ} \quad E_t = \pi \rho g r \sqrt{gD} (\bar{\eta})^2 \tau \quad (2.9)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งสู่ศูนย์กลางของโลก

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ

r คือ ระยะทางสถานีตรวจวัดไปยังแหล่งกำเนิดคลื่นสึนามิ

D คือความลึกของท้องทะเลที่จุดตรวจวัดคลื่นสึนามิ

$\bar{\eta}$ คือความสูงเฉลี่ยของคลื่นสึนามิ และ

τ คือคาบของคลื่นสึนามิ

จากสมการ 2.1 ถึง 2.8

$$\log E_t = 21.4 + 0.6m = 10.3 + 1.5M \quad (2.10)$$

ดังนั้นเราก็จะได้พลังงานของคลื่นแผ่นดินไหว กับคลื่นสึนามิในสมการที่ 2.2 และ 2.10 มาเปรียบเทียบกับกันตามที่เราต้องการ จะได้

$$\frac{E_s}{E_t} = \frac{E_0}{E'_0} = 10 \quad (2.11)$$

ดังนั้นเราจะเห็นว่าพลังงานของคลื่นสึนามิจะมีค่าน้อยกว่าคลื่นแผ่นดินไหว ประมาณ 10 เท่า

ตารางที่ 6 พลังงานของคลื่นสึนามิเปรียบเทียบกับคลื่นแผ่นดินไหว (Iida 1963a)

Earthquake	Magnitude (M)	Seismic wave energy (E_s) 10^{23} ergs	Tsunami Energy (E_t) 10^{23} ergs
Chile, May. 22, 1960	8.5	35.5	3.0
Sanriku, Mar. 2, 1933	8.3	17.8	1.7
Nankaido, Dec. 20, 1946	8.1	8.9	0.8
Tokachi, Mar. 4, 1952	8.1	8.9	0.8
Tonankai, Dec. 7, 1944	8.0	6.3	0.79
Aomori, Feb. 10 1945	7.3	0.56	0.004

การแผ่ลิ้งเข้าไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ(Inundation)

ถึงแม้คลื่นสึนามิจะมีความรุนแรง มีความเร็วสูง และมีอำนาจทำลายล้างมากมายเพียงใดก็ตาม ลักษณะชายฝั่งที่ได้รับผลกระทบ กลับสามารถสะท้อนถึงอิทธิพลของชายฝั่งที่สามารถทำได้ การทำลายของคลื่นสึนามินั้นมากหรือน้อยได้ โดยการสำรวจผลเสียหายที่ปรากฏอยู่ อย่างไรก็ตามจากการที่ทางราชการ และเอกชนท้องถิ่นช่วยกันบูรณฟื้นฟู สถานที่ได้รับความเสียหายจากคลื่นสึนามิ ทำให้การเข้าถึงข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อศึกษา ในภายหลังไม่สามารถทำได้เนื่องจากหลักฐานร่องรอยต่างๆ ได้ถูกทำลายไปหมดแล้ว แต่จากข้อมูลที่มีอยู่เดิมเราสามารถจำลองเหตุการณ์ขึ้นมาได้ (Scenario) และสามารถกำหนดเงื่อนไขต่างได้ ณ ที่นี้ เรากำหนดให้ความสูงของคลื่นสึนามิเป็น 10 เมตร และ 40 – 50 เมตร ตามลำดับโดยประมวลผลเพื่อทดสอบว่า ความสูงของคลื่นสึนามิที่ระดับปานกลางสูง 10 เมตร และระดับคลื่นสึนามิสูง 40-50 เมตร สามารถแผ่ลิ้งเข้าไปในแผ่นดินได้ไกลเพียงใด ณ ที่ลักษณะของพื้นที่ชายฝั่งแบบต่างๆ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ความสูงคลื่นสึนามิต่างๆ และ Inundation ที่ลักษณะของพื้นที่ชายฝั่งต่าง

(ปราโมทย์ ไชจิศุภกร และคณะ, 2548)

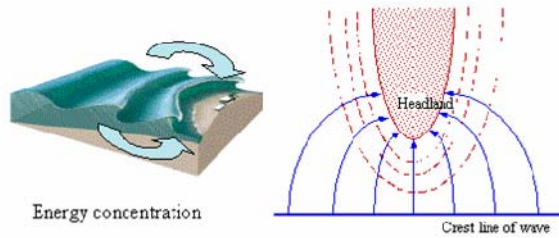
ลักษณะของพื้นที่ชายฝั่ง	ความสูงของคลื่นสึนามิ 10 เมตร	ความสูงของคลื่นสึนามิ 40-50 เมตร
พื้นที่พัฒนาแล้ว มีอาคารบ้านเรือน	แผ่ลิ้งเข้าไป 1.4 กม.	แผ่ลิ้งเข้าไป 9-12 กม.
พื้นที่เกษตรกรรม	แผ่ลิ้งเข้าไป 5.8 กม.	แผ่ลิ้งเข้าไป 36-41 กม.
พื้นที่ป่าชายเลน ป่าทึบ	แผ่ลิ้งเข้าไป 0.26 กม.	แผ่ลิ้งเข้าไป 2-3 กม.

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการแผ่ลิ้งเข้าไปในพื้นที่ดินของคลื่นสึนามิและลักษณะของสิ่งปลูกคลุมพื้นที่ (Land use) จากการคำนวณพบว่า บริเวณพื้นที่ป่าชายเลนและป่าทึบสามารถลดการแผ่ลิ้งเข้าไปในพื้นที่ดินของคลื่นสึนามิได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ ผลจากการสำรวจความสูงของการซัดขึ้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ ของคณะสำรวจจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าคลื่นสึนามิบริเวณแหลมปะการัง มีระดับสูงสุด 15.68 เมตร ถือว่าเป็น **Runup** ที่สูงที่สุดของประเทศไทย และลิ้งเข้าไปเป็นระยะทางไกลสุด 100 เมตร จากแนวชายฝั่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บ้านบางเนียง พบว่าคลื่นสึนามิมีระดับความสูงที่สุดคือ 11.93 เมตร ห่างจากชายฝั่ง 103.36 เมตร และมวลน้ำที่เคลื่อนเข้าไปในฝั่งเป็นระยะทางไกลสุด 1,102.37 เมตร จากแนวชายฝั่งที่บ้านบางเนียงถือได้ว่าเป็นบริเวณที่คลื่นสึนามิแผ่ลิ้งเข้าไปในแผ่นดินมากที่สุดในประเทศไทย

Propagation : Refraction effect

Wave fronts tend to align parallel to the shoreline so that they wrap around a headland



Finamura, DRCR

รูปที่ 23 ลักษณะพื้นที่ ที่มีลักษณะเป็นแหลมยื่นออกมา จะทำให้คลื่นมีการเลี้ยวเบนเสริมกัน
(ที่มา: Imamura, DRCR)

การประเมินความเสียหายของลักษณะชายฝั่ง

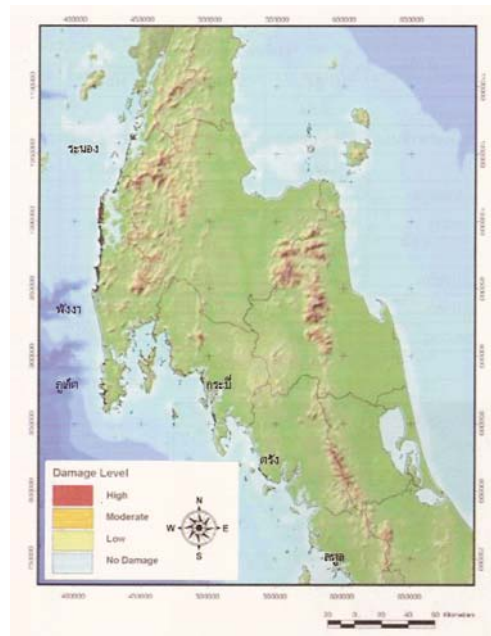
การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะชายฝั่งก่อนและหลังจากได้รับผลกระทบจากคลื่นสึนามิให้ได้ผลนั้นต้องมองจากภาพกว้าง นั่นคือมองในภาพรวมเสกใหญ่ๆ โดยการถ่ายภาพจากดาวเทียมที่มีรายละเอียดปานกลาง เช่น ดาวเทียม Landsat แต่หากต้องการภาพที่มีรายละเอียดสูง เพื่อศึกษาเฉพาะลงไปในพื้นที่ที่มีความเสียหายมาก เราจะใช้ข้อมูลที่มีรายละเอียดสูงขึ้นมากว่าเดิม ข้อมูลจาก ดาวเทียม IKONOS นับเป็นข้อมูลหนึ่งที่มีความเหมาะสม

การใช้ภาพถ่ายดาวเทียมบางครั้ง การมองด้วย Visible light ธรรมดาอาจไม่เพียงพอที่จะแยกให้เห็นถึงความแตกต่างของความเสียหาย ก่อนเกิดเหตุและหลังเกิดเหตุได้ การใช้ “ดัชนีพืชพรรณ” เป็นเทคนิคทางอ้อมที่ใช้ได้ผล สามารถใช้ศึกษาได้ โดยปกติพืชจะมีสีเขียว จากคลอโรฟิลล์ ซึ่งสะท้อนคลื่นแสงที่จำเพาะออกมา ที่ใช้กันอยู่แพร่หลายคือ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ซึ่งใช้ช่วงคลื่นแบนด์ 1 (0.58 – 0.68 ไมครอน) และแบนด์ 2 (0.725 – 1.0 ไมครอน) ซึ่งคำนวณได้ ดังนี้

$$NDVI = (Ch2 - Ch1) / (Ch2 + Ch1) \quad \text{----- (2.12)}$$

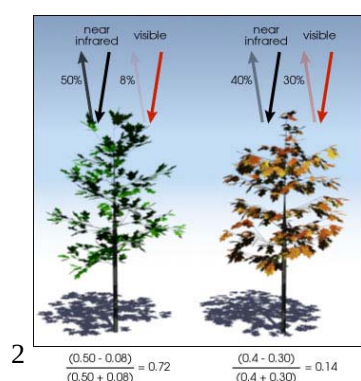
จากรูปที่ 24 แสดงถึงการสนองตอบการสะท้อนสเปกตรัมของพืชสีเขียว ดิน และน้ำเทียบกับความกว้างของแบนด์ 1 และ 2 ของ AVHRR (A Very High Resolution Radiometer) ปกติพืชมีความหนาแน่นมากจะสะท้อนสีเขียวออกมามาก แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์หรือความหนาแน่นของพื้นที่ป่า ภายหลังจากเกิดเหตุคลื่นสึนามิพัดเข้าทำลาย ทำให้ต้นไม้ได้รับความเสียหาย หักโค่น หรือความเค็มที่หลงเหลืออยู่บริเวณหน้าดิน ทำให้ดินเสื่อมสภาพ เป็นเหตุให้ต้นไม้ตายลง ใบไม่มีการเปลี่ยนสี สะท้อนสีเหลือง หรือน้ำตาลออกมามาก เมื่อนำภาพก่อนเกิดเหตุคลื่นสึนามิ และภายหลังจากเกิดเหตุมาเปรียบเทียบกัน ก็สามารถประมาณได้ทางอ้อมถึงความสูญเสียที่มีต่อสภาพพื้นที่ป่าไม้ได้

การประเมินความเสียหายโดยใช้ข้อมูลรายละเอียดปานกลาง จากการประเมินโดยใช้ $NDVI^2$ พบว่า มีพื้นที่ประสบภัยจากคลื่นสึนามิ จำนวน 90,095.3 ไร่ ครอบคลุมพื้นที่ 144.15 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้แบ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบสูง ($NDVI = \text{more than } 0.5$) 19,207.57 ไร่ ผลกระทบปานกลาง ($NDVI = 0.5-0.1$) จำนวน 58,222 ไร่ และได้รับผลกระทบน้อย ($NDVI = 0.0 - 0.1$) จำนวน 12, 665.77 ไร่ รูปที่ 24

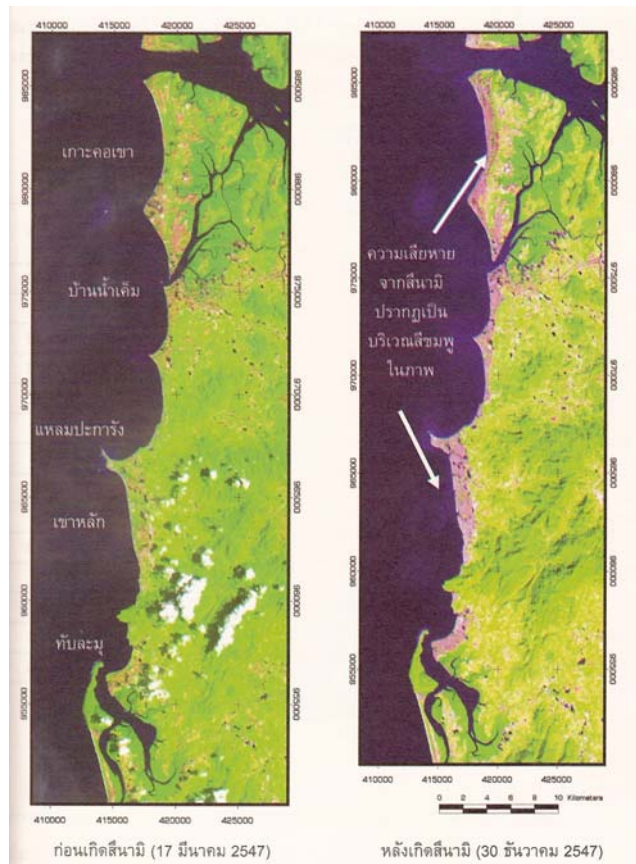


รูปที่ 24 พื้นที่ ที่ได้รับผลกระทบจากคลื่นสึนามิโดยประเมินจากความแตกต่างของค่า NDVI ของภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ก่อนและหลังเหตุการณ์ (ที่มา: อัปสรสุดา ศิริพงษ์, 2005)

การเปรียบเทียบความเสียหายจากคลื่นสึนามิ จากภาพถ่ายดาวเทียม รูปที่ 25



NDVI is calculated from the visible and near-infrared light reflected by vegetation. Healthy vegetation (left) absorbs most of the visible light that hits it, and reflects a large portion of the near-infrared light. Unhealthy or sparse vegetation (right) reflects more visible light and less near-infrared light. The numbers on the figure above are representative of actual values, but real vegetation is much more varied. (Illustration by: Robert Simmon).



รูปที่ 25 เปรียบเทียบความเสียหายจากคลื่นสึนามิ ภาพก่อนและหลังการเกิดคลื่นสึนามิ จากเกาะคอเขาถึงทับละมุ จังหวัดพังงา (ที่มา: อัสสรสุดา ศิริพงศ์, 2005)

การประเมินความเสียหายโดยใช้ข้อมูลรายละเอียดสูง โดยการเปรียบเทียบข้อมูลลักษณะสิ่งปกคลุมดิน ก่อนเกิดคลื่นสึนามิ และหลังจากเกิด ซึ่งลักษณะสิ่งปกคลุมดินแบ่งเป็น 10 ชนิด ได้แก่ ชุมชน นาทุ่ง พื้นที่โล่ง มะพร้าว ไม้ยืนต้น รีสอร์ท หาดทราย แหล่งน้ำ ป่าชายหาด และเส้นทางคมนาคม

ตารางที่ 8 ลักษณะสิ่งปกคลุมดิน และรายละเอียด

สิ่งปกคลุมดิน	รายละเอียด
ชุมชน	บ้านเรือนประชาชน
นาทุ่ง	บ่อทุ่ง คันกั้นน้ำบริเวณบ่อทุ่ง
มะพร้าว	ต้นมะพร้าว ปาล์มน้ำมัน
ไม้ยืนต้น	ยางพารา ต้นสน ผลไม้
รีสอร์ท	รีสอร์ทชายหาดและสิ่งปลูกสร้างบริเวณชายหาด
หาดทราย	หาดเลน หาดทรายที่เกิดขึ้น
แหล่งน้ำธรรมชาติ	บ่อน้ำ สระน้ำ แม่น้ำ ลำคลอง
เส้นทางคมนาคม	ถนน ซอย
ป่าชายหาด	ป่าโกงกาง ป่าสน ป่าเสมหิ
พื้นที่โล่ง	พื้นที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ สิ่งคลุมดิน เช่น หญ้า ดินโล่ง

การแยกระดับความเสียหาย ได้แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ตามความรุนแรง ดังตารางที่ 9

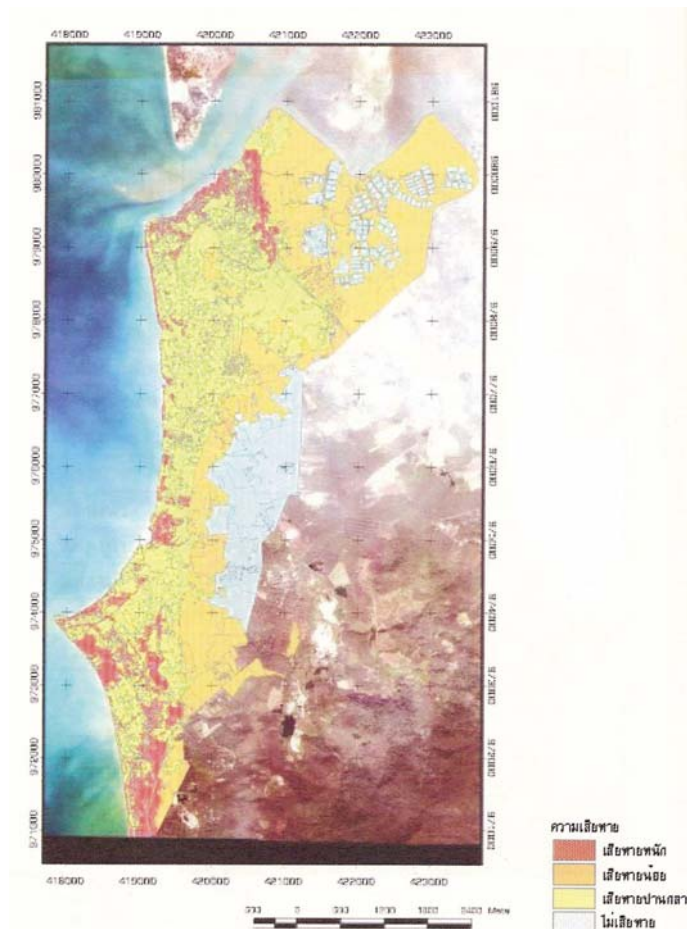
ตารางที่ 9 การแบ่งระดับความเสียหาย

ความเสียหาย	รายละเอียดความเสียหาย
เสียหายหนัก	บ้านเรือนถูกพัดพาไปทั้งหลัง หรือถูกทำลายทั้งหมด ชายฝั่งมีการกัดเซาะรุนแรง เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณชายฝั่งอย่างชัดเจน เศษวัสดุทับถมทั่วไป
เสียหายปานกลาง	บ้านเรือนเสียหายมากแต่ไม่หมดทั้งหลัง มีเศษวัสดุทับถม ชายฝั่งเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
เสียหายน้อย	บ้านเรือนเสียหายเพียงเล็กน้อย หรือ ไม่เกิดความเสียหาย มีเศษวัสดุทับถม
ไม่ได้รับผลกระทบ	ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

การจำแนกความเสียหายจากลักษณะการใช้ที่ดิน นับเป็นตัวอย่างที่ชัดเจน ต่อสหสัมพันธ์ระหว่าง Run-up ของคลื่นสึนามิ กับลักษณะชายฝั่ง ดังการสำรวจที่บ้านน้ำเค็ม ตำบลบางม่วง อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา จากการแปลภาพจากดาวเทียม IKONOS ด้วยสายตา หลังเกิดเหตุการณ์ ดังตารางที่ 7 และรูปที่ 26-27



รูปที่ 26 ลักษณะของสิ่งที่ปกคลุมดินหลังจากเหตุการณ์คลื่นสึนามิบ้านน้ำเค็มและบ้านไทยใหม่
(ที่มา : ภาพถ่ายจากดาวเทียม IKONOS สทอภ.)



รูปที่ 27 ลักษณะความรุนแรงและความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณบ้านน้ำเค็ม และบ้านไทยใหม่ โดยจำแนกจากดาวเทียม IKONOS ร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ (ที่มา: สทอภ.)

การใช้ข้อมูลดาวเทียมมีประโยชน์อย่างยิ่ง โดยเฉพาะการศึกษาเป็นบริเวณกว้าง เพื่อประเมินความเสี่ยง ข้อมูลนี้สะท้อนให้เห็นถึงความสูงของ Run-up ของคลื่นสึนามิ และการแผ่ลึกเข้าไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ (Inundation) จากการประเมินด้วยดาวเทียมนี้ พบว่า จังหวัดพังงา เสียหายมากที่สุด

ตารางที่ 10 ความเสียหายแบ่งตามลักษณะการใช้ที่ดิน บริเวณบ้านน้ำเค็ม – บ้านไทยใหม่ ตำบลบางม่วง อำเภอดงตาล จังหวัดพังงา

ลักษณะของสิ่งปกคลุมดินและความเสียหายที่เกิด	พื้นที่(ไร่)	ร้อยละ
ชุมชน – ไม่เสียหาย	4.03	0.06
ชุมชน – เสียหายน้อย	7.96	0.12
ชุมชน – เสียหายปานกลาง	82.60	1.22
ชุมชน – เสียหายหนัก	88.41	1.30
นาทุ่ง – ไม่เสียหาย	439.15	6.47
นาทุ่ง – เสียหายน้อย	3.22	0.05
นาทุ่ง – เสียหายปานกลาง	18.47	0.27
นาทุ่ง – เสียหายหนัก	2.78	0.04

พื้นที่โล่ง – ไม่เสียหาย	415.14	6.12
พื้นที่โล่ง - เสียหายน้อย	288.95	4.26
พื้นที่โล่ง – เสียหายปานกลาง	2,679.07	39.47
พื้นที่โล่ง – เสียหายหนัก	1,034.83	15.25
มะพร้าว – เสียหายน้อย	16.59	0.24
มะพร้าว – เสียหายปานกลาง	422.10	6.22
ไม้ยืนต้น - ไม่เสียหาย	1,284.04	18.92

จากตารางความเสียหาย เราสามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟได้ดังกราฟได้ และจากกราฟจะพบว่าบริเวณพื้นที่โล่งที่มีความเสียหายปานกลางนั้นมีสูงถึง 39.47 % และเสียหายหนัก 15.25 % ซึ่งเป็นตัวเลขที่สูงมาก และบริเวณที่มีต้นไม้ยืนต้นขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น ที่ไม่มีความเสียหายเลย 18.92% ของพื้นที่ ที่คลื่นสึนามิพัดโถมเข้าปกคลุม

สหสัมพันธ์ระหว่างการจัดชั้นไปในแผ่นดินของคลื่นสึนามิ (Run-up) ของคลื่นสึนามิกับลักษณะชายฝั่ง

$$\text{ลักษณะชายฝั่ง กำหนดให้เป็น } N = ((\frac{1}{\theta})90 + \kappa(H) + B + \varphi) / 1000 \quad \text{-----} \quad (2.13) \text{ (กูเวียง, 2006)}$$

โดย N = ดัชนีลักษณะชายฝั่ง

θ = มุมเฉลี่ย ความชันของชายฝั่ง: พื้นที่ราบ มีค่า = 0, พื้นที่ตั้งฉากกับพื้นดิน มีค่า = 90

κ = ความหนาของพื้นที่ป่าชายเลนนับตั้งแต่ชายหาดขึ้นไปในฝั่ง (m/km)

H = ความกว้างของแนวต้นไม้ ภายในพื้นที่ยาว 1000 เมตรขนานกับชายฝั่ง (m/km)

B = พื้นที่สิ่งปลูกสร้างแนวปะทะคลื่น เช่น อาคารบ้านเรือน โรงเรียน ฯลฯ ยาว 1 กม. ขนานชายฝั่ง (m/km)

φ = โครงสร้างและรูปร่างของชายหาด ซึ่ง มีค่า = 2 เมื่อเป็นหาดชัน, มีค่า = 1 เมื่อเป็นหาดลาด และ มีค่า = 0 เมื่อเป็นหุบเขาเรือสอบเข้าหากัน

ตารางที่ 11 ตัวอย่าง ดัชนีลักษณะชายฝั่งและ Run-up

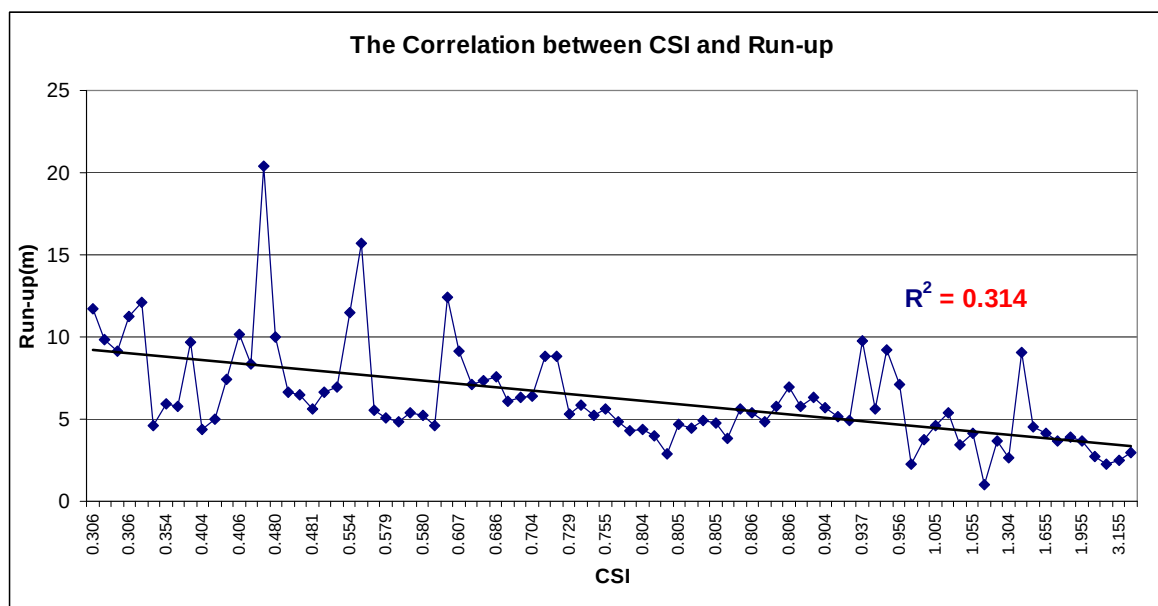
Location Name	CSI(N)	Run-up Height (m)
Tanui Beach	0.7	5.65
Tanui Beach	0.7	7.13
Nai Ham Beach	0.6	8.83
Nai Ham Beach	0.6	8.81
Nakalay Beach	1.1	4.18
Nakalay Beach	1.2	3.68
Nakalay Beach	0.8	4.63
Surin Beach	1.8	2.25
Surin Beach	0.9	4.14
Nai Thorn Beach	0.8	5.59
Sai Kaew Beach	0.8	5.41

Sarasin Bridge	1.0		5.36
Pa ka Rang Beach	0.6		12.41
Pa ka Rang Beach	0.6		9.15
Pa ka Rang Beach	0.6		15.68
Navy Base	0.9		5.71
Navy Base	0.9		5.14
Ban Chong Fah	0.9		9.20
Pak Tawib (Coco Palm Hotel)	0.5		20.38
Tab Tawan Beach	0.7		7.11
Tab Tawan Beach	0.7		7.38
Bang Wan	1.7		2.51
Pra Pahd Beach	0.4		10.14
Talay Nok Village	0.5		9.99
Lanta Island (Ban Ai Dao)	0.5		6.65
Lanta Island (Ban Khlong Hoi Khong)	0.5		6.47
Lanta Island (Kan Tiang Beach)	0.5		5.62
Lanta Island (Leam Song)	0.5		2.91
Chennai Light House	0.3		2.27
Fore Shore estate	1.2		4.51
Besant Nagar (Elliot's Beach)	1.4		2.76
Thiruvannamiyur Beach	1.1		3.65
Kottivakkam	0.7		4.85
Silver beach Devanampattinam	0.7		7.55
Devanampattinam fishing village	0.3		11.25
Thazhanguda (Cuddalore)	1.4		3.66
Cuddalore	0.9		9.08
Periya Kalapet kuppam	0.7		5.79
Periya Kalapet kuppam	0.7		6.93
Velankanni Church	0.7		4.90
Kallar village	0.6		4.30
Nagapattinam Port	0.6		4.59
Aariyanatu Theru fishing village	0.7		4.68
Nagore (7 km from North of Nagapattinam)	0.8		5.81
Nagore (7 km from North of Nagapattinam)	0.8		6.35
Karaikal beach (18 km from North of Nagapattinam)	0.8		4.48

Athirampattinam	1.9		2.97
MARINA BOAT LAGOON	1.2		2.69
PHI PHI ISLAND(SOUTH)	0.4		4.60
PHI PHI ISLAND(SOUTH)	0.4		5.91
PHI PHI ISLAND(SOUTH)	0.4		5.81
PHI PHI ISLAND(NORTH)	0.4		4.36
PHI PHI ISLAND(NORTH)	0.4		5.01
LO NHA LA BEACH	0.8		4.91
LO NHA LA BEACH	0.8		5.84
LO NHA LA BEACH	0.8		5.26
LO NHA LA BEACH	0.8		5.65
LO NHA LA BEACH	0.8		4.84
BAN THAP TAI	0.9		3.47
PHRA THNG Island	0.6		6.61
PHRA THNG Island	0.6		6.95
PAK JOK BEACH	0.6		5.56
PAK JOK BEACH	0.6		5.06
PAK JOK BEACH	0.6		4.88
PAK JOK BEACH	0.6		5.40
KO KHAO Island	0.7		4.40
KO KHAO Island	0.7		3.96
KO KHAO Island	0.8		3.74
KO KHAO Island(west)	0.7		5.31
KO KHAO Island(west)	0.6		11.50
PRA PAS BEACH	0.7		6.12
PRA PAS BEACH	0.7		6.34
PRA PAS BEACH	0.7		6.39
LEAM SON NATIONAL PARK	1.9		3.93
RANONG PORT	1.2		0.98
KO HEI ISLAND	0.8		4.73
KO HEI ISLAND	0.8		3.85
RA YA ISLAND(NORTH RA CHA ISLAND)	0.3		11.7
RA YA ISLAND(NORTH RA CHA ISLAND)	0.3		9.83
RA YA ISLAND(NORTH RA CHA ISLAND)	0.3		9.17
RA CHA NOI ISLAND	0.5		7.42

BAHN KHAO LAK	0.4	8.38
BAHN KHAO LAK	0.4	9.67
KHOLAK ANDAMAN BEACH(KHAO LAK)	0.3	12.12
BANG NIANG BEACH(KHAO LAK)	0.9	9.78
PATONG BEACH	0.6	5.24

กราฟที่ 1 สหสัมพันธ์ ระหว่าง CSI และ Run-up



จากกราฟที่ 1 แนวโน้มของความสูงของ Run-up มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ ดัชนีชายฝั่ง (CSI) มีค่าเพิ่มขึ้น จากการหา สหสัมพันธ์ โดย Regression ดังหัวข้อต่อไปนี้

ผลการวิเคราะห์ ของ Run-up Height (m) กับ CSI (N)

Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
CSI	6.2774	3.0664	86
RUNUP	.8627	.5748	86

Correlations

		CSI	RUNUP
Pearson Correlation	CSI	1.000	-.472
	RUNUP	-.472	1.000
Sig. (1-tailed)	CSI	.	.000
	RUNUP	.000	.
N	CSI	86	86
	RUNUP	86	86

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	RUNUP ^a	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: CSI

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.472 ^a	.223	.214	2.7191

a. Predictors: (Constant), RUNUP

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	178.158	1	178.158	24.096	.000 ^a
	Residual	621.074	84	7.394		
	Total	799.232	85			

a. Predictors: (Constant), RUNUP

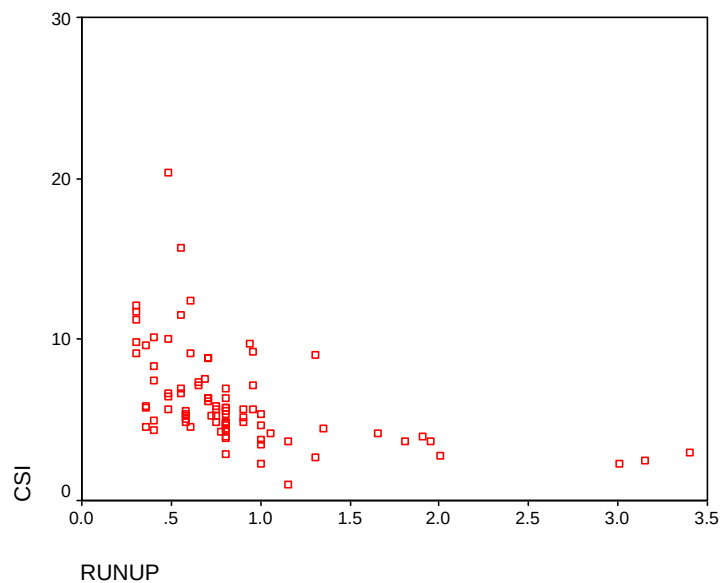
b. Dependent Variable: CSI

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	8.450	.531		15.915	.000	7.395	9.506
	RUNUP	-2.519	.513	-.472	-4.909	.000	-3.539	-1.498

a. Dependent Variable: CSI

Graph

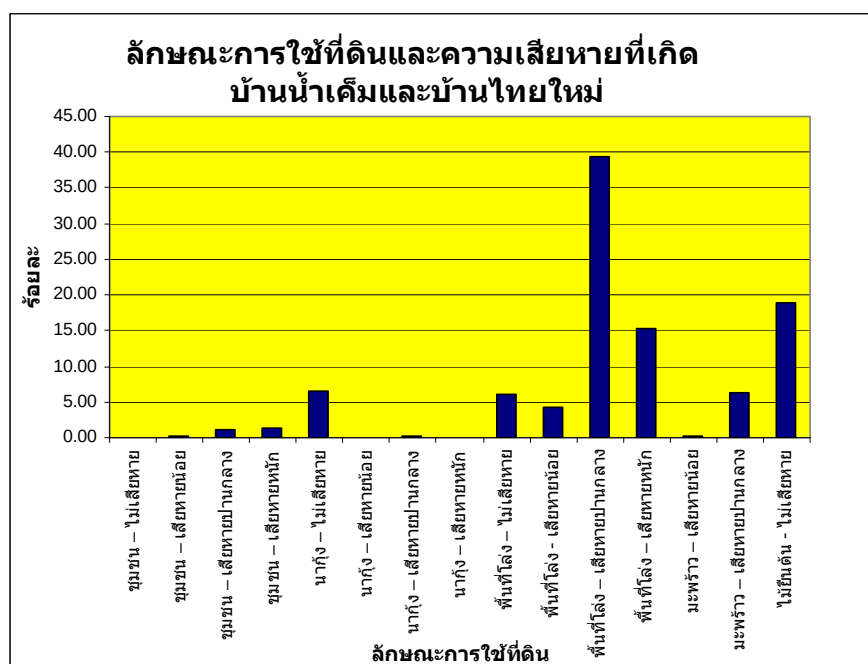


ผลที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.223 แสดงว่าสมการถดถอยนี้สามารถอธิบายการกระจายของ Run-up Height (m) ได้ 22.3 เปอร์เซ็นต์ หรือ CSI (N) มีอิทธิพลต่อ Run-up Height (m) อยู่

สามารถกล่าวได้ว่า Run-up และ CSI มีสหสัมพันธ์กัน อย่างไรก็ตาม นับเป็นการจุดประกายความคิดสำหรับการวิจัยในภายหลัง ที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีชายฝั่งมากที่สุดมี 3 ปัจจัยหลัก คือ

- แนวป่าเลนหรือป่าทึบบริเวณชายฝั่ง
- ลักษณะ Topology ของชายฝั่ง
- การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Used)

กราฟที่ 2 ลักษณะการใช้ที่ดินและความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณบ้านน้ำเค็มและบ้านไทยใหม่



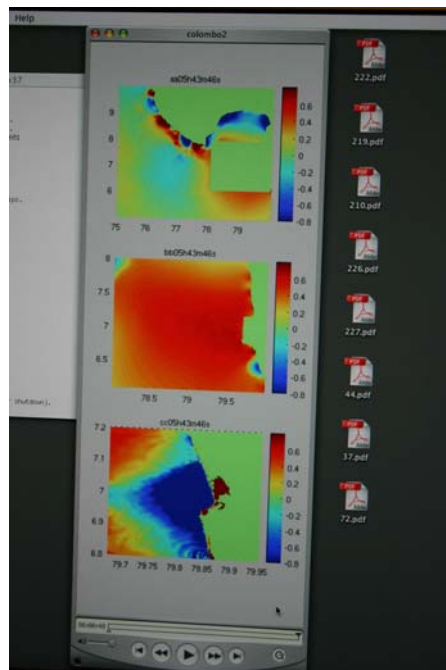
จากกราฟที่ 2 ความเสียหายส่วนใหญ่เกิดบริเวณพื้นที่โล่ง โดยมีระดับความเสียหายปานกลางถึงหนักมากที่สุด นอกจากนี้ พื้นที่ ที่เป็นไม้ยืนต้นเกือบ 20 % ไม่มีความเสียหาย นี่เป็นอีกตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสิ่งปกคลุมดินเช่น ต้นไม้สามารถลดความเสียหายที่เกิดจากคลื่นสึนามิได้

การเกิดคลื่นสึนามิขนาดใหญ่ ก่อให้เกิดความเสียหายมหาศาลเป็นวงกว้าง ประเทศไทยเป็นอีกหนึ่งในหลายประเทศที่ได้รับผลกระทบ การเอาชนะภัยธรรมชาติที่ยิ่งใหญ่ขนาดนี้คงทำได้ยาก การเรียนรู้เพื่อปรับตัวและลดความเสียหายจากภัยธรรมชาติเป็นวิธีที่พึงปฏิบัติ

การลดผลกระทบของคลื่นสึนามิ

ความเสียหายของคลื่นสึนามิจะลดลงด้วยการกระทำ 3 อย่าง

- 1) การประเมินความเสียหาย (Hazard Assessment) การทำ **tsunami inundation maps** ทั้งเฉพาะบริเวณและโดยรวมๆ เช่นทั้งจังหวัด โดยใช้วิธีการที่เป็นที่ยอมรับกันด้วยการสร้างแบบจำลอง เช่น Method of Splitting Tsunami (MOST) (รูป 21) ซึ่ง Dr. Vasily Titov ที่ NOAA/PMEL เป็นผู้เขียน ระหว่างที่รองศาสตราจารย์อัปสรสุดาฯ ไปทำงานในฐานะ visiting scientist และ ดร.ปราโมทย์ โคจิสุกร จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ไปฝึก run model โดยใช้ข้อมูลของไทย ผลจากการ run model ทำให้สามารถประเมินความเสี่ยงของบริเวณฝั่งทะเลที่จะเผชิญกับคลื่นสึนามิได้
- 2) การลดภัยพิบัติ (Mitigation) แผนปฏิบัติการฉุกเฉิน (emergency response) ในการจัดการต่างๆ เช่น โดยติดตั้งแผ่นป้ายเตือนเส้นทางหนี วางแผนจัดการเส้นทางอพยพฉุกเฉิน กำหนดจุดปลอดภัย หากมีคลื่นสึนามิเกิดขึ้น ณ ชายหาดที่เคยได้รับความเสียหายจากคลื่นสึนามิ จัดทำโปรแกรมในการให้ความรู้แก่ประชาชนทุกระดับ ทั้งคนท้องถิ่นและโรงเรียน มหาวิทยาลัย การทำแผนการหนีต้องอาศัย **tsunami inundation maps** ของแต่ละหาด เพราะทางหนีไม่เหมือนกัน เนื่องจากภูมิประเทศต่างกัน หมั่นทำการฝึกซ้อม ทำความเข้าใจกับการปฏิบัติตนเมื่อเกิดภัยฉุกเฉิน



รูปที่ 28 โครงสร้างของ MOST Models (ที่มา: อัปสรสุดา ศิริพงศ์, 2005)

- 3) แนวทางการเตือนภัย พัฒนาและจัดตั้งเครือข่ายของ **Early warning tsunami detection buoys** ในบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวในทะเล รวมทั้ง seismometers และ tide gauge stations เพื่อส่งข้อมูลไปให้ Tsunami Warning Center ในภูมิภาคนั้น

ระบบการเตือนภัย

ความเสียหายจากชีวิตและทรัพย์สินจากคลื่นสึนามิจะลดลงได้หากมีการเตือนภัยอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นในแปซิฟิก Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) ได้รับการจัดตั้งขึ้นที่ Ewa Beach ฮาวาย รูปที่ 29 โดยความตกลงของนานาชาติของที่ประชุม UNESCO/IOC ตั้งขึ้นเมื่อปี 1949 มีประเทศสมาชิก 26 ประเทศรวมทั้งไทย ระบบการเตือนภัยจะประกอบไปด้วย

1) ทู่นตรวจวัดคลื่นสึนามิ ซึ่งต้องทอดสมอในทะเลลึก เพื่อตรวจหาคลื่นสึนามิ หากมีแผ่นดินไหวใต้ทะเล (รูปที่ 30) ทู่นนี้มีราคาประมาณ 300,000 เหรียญสหรัฐ แต่จะมีราคาถูกลงถ้าสั่งทำจำนวนมาก มีอายุการใช้งานไม่ต่ำกว่า 5 ปี โดย NOAA/PMEL (Pacific Marine Environmental Lab) เป็นผู้ทำขึ้นตามความตกลงของการประชุมของคณะกรรมการ International Co-ordination Group for the Tsunami Warning System in the Pacific สำหรับมหาสมุทรอินเดียจะมีการจัดตั้งคณะกรรมการนี้โดยการประชุมใหญ่ของ IOC ในเดือนมิถุนายน 2006



รูปที่ 29 Pacific Tsunami Warning Center
(ที่มา: <http://www.cmo.nl/pe/pe27/immage/ptwc>)

2) ข้อมูลแผ่นดินไหวจากศูนย์ข้อมูลแผ่นดินไหว (NEIC) ข้อมูลจากสถานีวัดระดับน้ำใกล้ฝั่ง ล่าสุดข้อมูลจากดาวเทียม Jason-1 เพื่อวัดคลื่นสึนามิในทะเลลึก

3.) เมื่อเกิดคลื่นสึนามิขึ้น ข้อมูลจากทู่นจะถูกส่งไปยังดาวเทียม เพื่อเชื่อมโยงไปยัง PTWC ในแบบทันที ศูนย์นี้จะมีการทำงาน 24 ชั่วโมง ต้องใช้แบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง โดยผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นนักสมุทรศาสตร์ฟิสิกส์ ด้านคลื่นทะเล ในการพยากรณ์ว่าคลื่นสึนามิจะเดินทางไปถึงฝั่งทะเล ในเวลาต่าง ๆ อย่างไร แล้วจะประกาศเตือนไปยังประเทศสมาชิกต่อไป

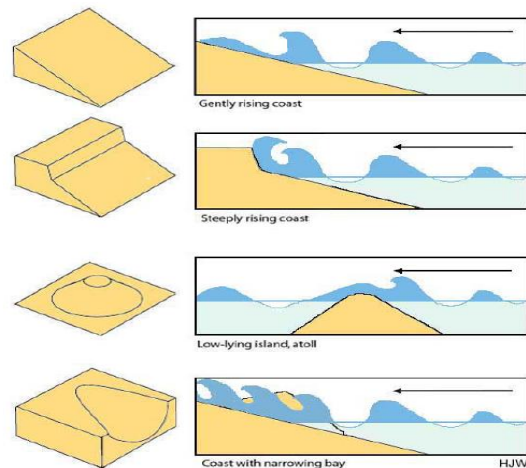


รูปที่ 30 Tsunami Buoy ที่ NOAA/PMEL ซีแอตเติล
(ที่มา: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/index.html>)

การสำรวจความสูงของคลื่นสึนามิมีวัตถุประสงค์คือหาร่องรอยความสูงสุดของคลื่นที่ซัดซัดขึ้นไปได้สูงสุด ของคลื่นสึนามิตามที่มีร่องรอยปรากฏอยู่ และระยะทางที่คลื่นสึนามิซัดขึ้นฝั่งได้ไกลที่สุดเป็นเท่าใด

สรุปผล สหสัมพันธ์ระหว่าง Run-up ของคลื่นสึนามิ กับลักษณะชายฝั่ง

ลักษณะชายฝั่งทั้งที่เป็น Land use หรือสิ่งที่ยึดดิน และรูปร่างลักษณะของชายฝั่ง กับ Run up จากคลื่นสึนามิ นั้น มีความสัมพันธ์ดังกราฟที่ 2 ในหน้าต่อไป จากการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ พบว่า ลักษณะของชายฝั่งที่เป็นชายหาดลาดที่มีความชันไม่เกิน 30 องศา และมีลักษณะของพื้นที่รูปร่างเรียวสอบเข้าหากัน หรือลักษณะหาดเรียบแคบ ดังรูป 31 จะมีผลทำให้ Run-up ของคลื่นสึนามิ นั้น มีความสูงมากกว่า หาดที่ชันกว่าและมีพืชปกคลุมหนาแน่นกว่า ดังนั้นการที่มีป่าชายเลนปกคลุมบริเวณชายหาดเลน นั้น แม้ไม่สามารถจะป้องกันคลื่นสึนามิไม่ให้โถมทำลายได้ แต่อย่างน้อยที่สุดหากมีความหนาแน่นปกคลุมในระดับความหนาของแนวคันไม้ป่าชายเลน อย่างน้อย 50 เมตร จากขอบฝั่ง ก็จะเป็นการเพิ่มแรงเสียดทาน ทำให้ความเร็วของคลื่นลดลง ซึ่งพลังงานจลน์ และโมเมนตัมจะลดลงด้วย ทั้งนี้ เนื่องจาก ทั้งพลังงานจลน์ และโมเมนตัม ขึ้นกับความเร็วดังสมการ $E_k = \frac{1}{2} mV^2$ และ $P = mv$ เมื่อความเร็วของคลื่นสึนามิลดลง ทั้ง การแผ่เข้าไปในพื้นที่ชายฝั่งและ Run-up ของคลื่นสึนามิ ก็จะลดลง ส่วนบริเวณหาดลาดไม่มีป่าชายเลนปกคลุม และหาดมีลักษณะแคบ รวมทั้งหาดที่มีลักษณะเป็นแหลมยื่นออกไปในทะเล จะพบ Run-up มีความสูงมากที่สุด



รูปที่ 31 ลักษณะของคลื่นสึนามิเข้าปะทะชายหาดที่มีลักษณะต่างกัน

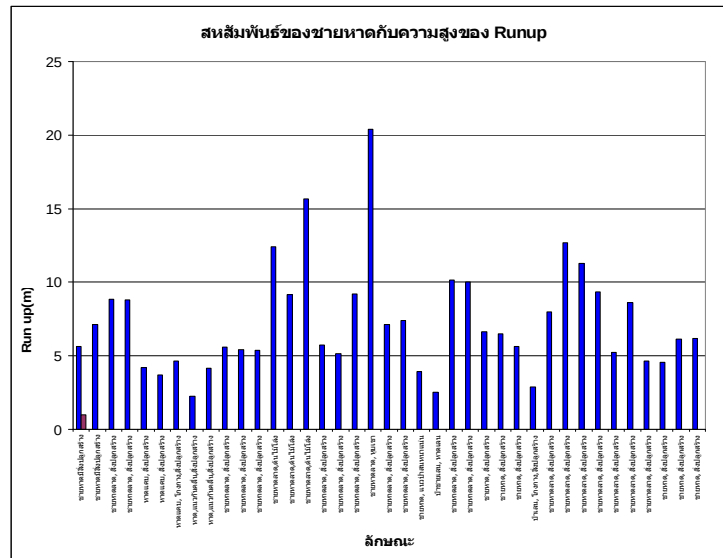
(ที่มา: <http://www.ess.washington.edu/tsunami>)

เมื่อเปรียบเทียบกราฟเฉพาะบริเวณพื้นที่ป่าชายเลนกับพื้นที่หาดโล่ง ลาด มีสิ่งปกคลุมน้อย จะพบอย่างชัดเจนว่ามีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยบริเวณที่ปกคลุมด้วยป่าชายเลน หรือแม้กระทั่งป่าสนที่มีความหนาแน่น ความสูงของคลื่นสึนามิที่เห็นได้จากรอยบนคันไม้และสิ่งปลูกสร้างบางแห่งนั้นพบว่า บริเวณที่มีป่าชายเลนมีความสูงของ Run-up น้อยกว่าอย่างชัดเจน

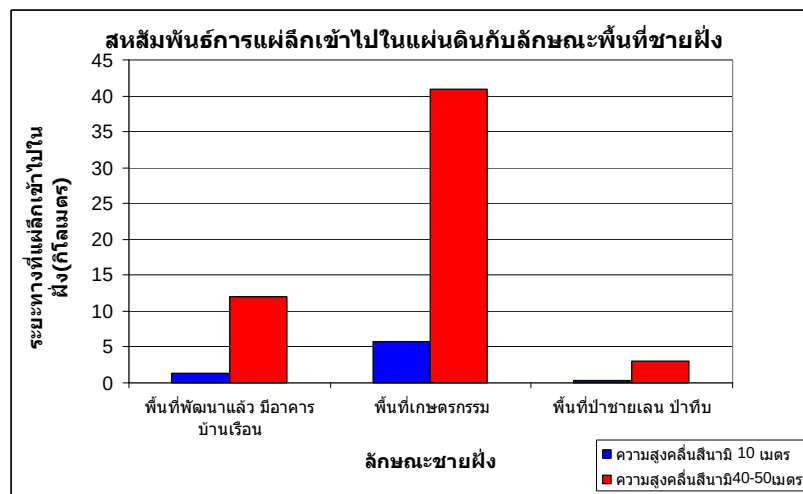
ผลกระทบของคลื่นสึนามิ กล่าวโดยสรุปมี 3 อย่างคือ

1. น้ำท่วม
2. แรงกระแทกของคลื่นต่อโครงสร้าง พลังงานคลื่น $= 1/8(\rho g H^2)$ (จูล/ม²)
3. การกัดเซาะชายฝั่ง

กราฟที่ 3 สหสัมพันธ์ระหว่างความสูงของ Run-up กับลักษณะชายฝั่ง



กราฟที่ 4 สหสัมพันธ์การแผ่ลึกเข้าไปในแผ่นดินกับลักษณะพื้นที่ชายฝั่ง



กราฟที่ 3 แสดงไว้อย่างชัดเจนถึงความสามารถในการจัดวางการแผ่ลึกเข้าไปในแผ่นดิน (Inundation) ของคลื่นสึนามิ โดยเปรียบเทียบความสูงของคลื่นสึนามิ ที่สูง 10 เมตร และสูง 40-50 เมตร พบว่าที่ความสูงทั้งสองระดับ สภาพพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่มีลักษณะเป็นป่าชายเลน หรือป่าทึบ สามารถลดการแผ่ลึกเข้าไปในพื้นที่ดินมากที่สุด ($R^2 = 0.0514$)

การจัดทำแผนที่เสี่ยงภัยจากคลื่นสึนามิ ใน 6 จังหวัดภาคใต้ฝั่งตะวันตก นอกจากจะใช้ข้อมูลจากการสำรวจในพื้นที่จริงทั้งหมด เช่น ความสูงของ Run-up ความชันของพื้นที่ Inundation สิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ป่าชายเลน ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะชายหาดแล้ว ยังใช้ข้อมูลความสูงของพื้นที่ จากการใช้เครื่องบอกตำแหน่งจากดาวเทียม ที่สามารถบอกระดับความสูงของพื้นที่นั้นเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean sea level) และข้อมูลความสูงของพื้นที่ จาก Google Earth มาประกอบ และการทำ Scenario การเกิดคลื่นสึนามิ ณ ตำแหน่งที่ต่างๆ ทำให้สามารถประเมิน พื้นที่ ที่มีความเสี่ยงจากการได้รับผลกระทบจากคลื่นสึนามิได้ดัง รูปที่ 35



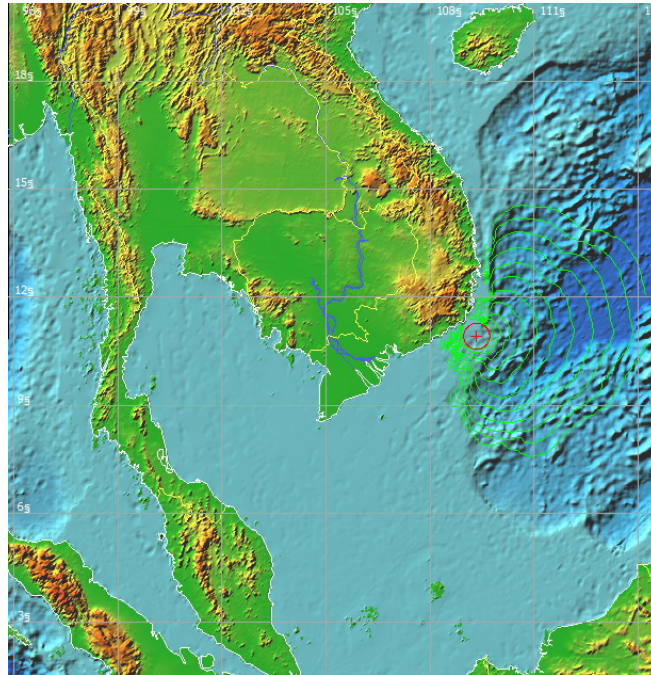
รูปที่ 32 แผนที่เสี่ยงภัยผลกระทบจากคลื่นสึนามิ
 สีแดงหมายถึงบริเวณที่มีโอกาสเกิดผลกระทบที่รุนแรงมากกว่า
 (ที่มา: แผนที่ประกอบจาก <http://www.Googleearth.com>)

จากแผนที่เสี่ยงภัยผลกระทบจากคลื่นสึนามิ พบว่า บริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันตกตอนบนเกือบตลอดแนวชายฝั่ง มีความเสี่ยงสูงกว่าบริเวณแนวด้านล่าง เนื่องจากมีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงที่จะเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ เหนือขึ้นมาจากเกาะสุมาตรา นั่นคือบริเวณหมู่เกาะนิโคบาร์ และหมู่เกาะอันดามัน ประเทศอินเดีย และนอกจากนี้ในทะเลอันดามัน ใกล้กับหมู่เกาะอันดามัน ยังมีโอกาสเกิดภูเขาไฟใต้น้ำ และ Landslide อีกด้วย ซึ่งยิ่งสนับสนุนโอกาสที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตกตอนบน จะได้รับผลกระทบจากคลื่นสึนามิมากขึ้นนั่นเอง ส่วนบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันตก นอกจากจะอยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นสึนามิมากกว่าแล้ว ลักษณะภูมิประเทศ เช่น ลักษณะชายหาด ยังมีความลาดเอียงน้อยกว่า พื้นที่เป็นเกาะแก่งมากกว่า และมีป่าชายเลนปกคลุมมากกว่า ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีผลต่อทั้ง Run-up และ Inundation ของคลื่นสึนามิ

ข้อเสนอแนะ

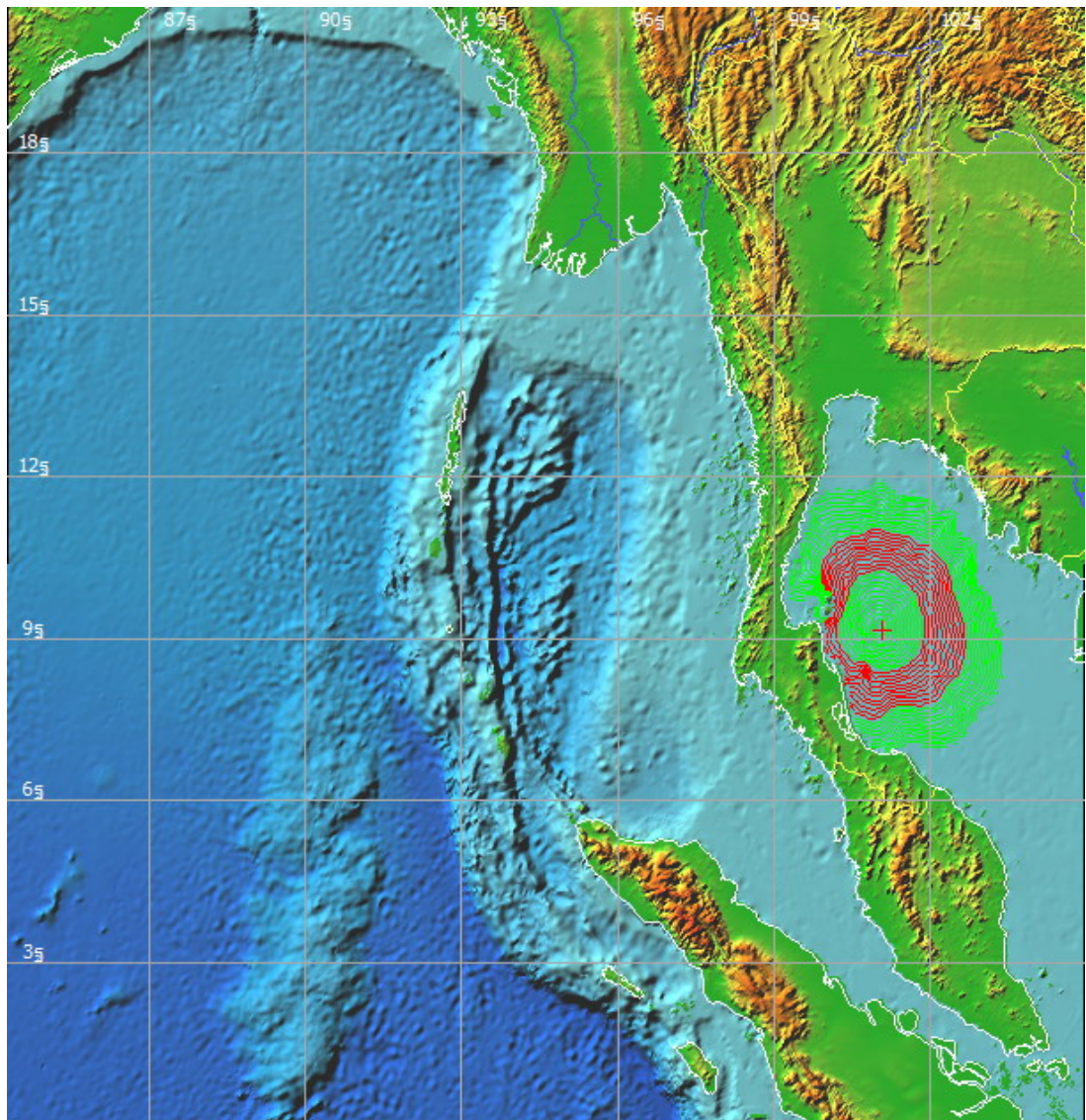
ป่าชายเลน และต้นไม้ที่ปกคลุมพื้นที่บริเวณใกล้ชายหาด หรือป่าเลนที่ติดทะเล เหล่านี้สามารถเป็นแนวกำแพงกันคลื่นธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพมาก ทั้งยังมีประโยชน์ต่อการเพิ่มความสมบูรณ์แก่ระบบเอ็สตูรี (Estuary) ซึ่งจะส่งผลโยนโยไปสู่ความหลากหลายและอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรสัตว์น้ำด้วย นับว่ามีประโยชน์อย่างมากหาศาล สมควรที่ภาครัฐและเอกชนจะส่งเสริมอย่างจริงจังให้มีการปลูกป่าชายเลนเพื่อเป็นแนวป้องกันภัยธรรมชาติและแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์น้ำในชุมชน อันจะส่งผลต่อชีวิต ความเป็นอยู่ของประชาชนโดยตรง อย่างไรก็ตามแม้ว่าเราสร้างแนวป้องกันแล้วแต่การเตรียมพร้อมรับมือกับคลื่นสึนามิก็เป็นสิ่งที่ควรกระทำ หากเกิดคลื่นสึนามิขึ้นในบริเวณที่จะส่งผลกระทบต่อประเทศไทย ทางราชการก็จะอพยพราษฎร ไปสู่ที่ปลอดภัย

จากข้อมูลของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา พบว่า แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวที่จะก่อให้เกิดคลื่นสึนามิ ในทะเลอันดามันนั้น อยู่บริเวณ Sunda trend หรือแนวชนกันแบบมุดตัวโดยเฉพาะบริเวณหมู่เกาะนิโคบาร์ หมู่เกาะอันดามัน ประเทศอินเดีย บริเวณหมู่เกาะอันดามัน และตอนเหนือของเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย นอกจากโอกาสเกิดคลื่นสึนามิจากแผ่นดินไหวแล้วยังมีโอกาสเกิดจากแผ่นดินถล่มใต้ทะเลอีกด้วย เพราะเป็นแนวหุบเหวลึกใต้ทะเล เมื่อเกิด



รูปที่ 33 คลื่นสึนามิที่แหล่งกำเนิดใกล้ภูเขาไฟได้ทะเลชายฝั่งประเทศเวียดนาม
(ที่มา: จากโมเดล WinITDB-(ITDB1))

ส่วนบริเวณที่มีความเป็นไปได้และอันตรายที่สุดบริเวณอ่าวไทย คือ แหล่งขุดเจาะน้ำมัน ในอ่าวไทยนั่นเอง แหล่งขุดเจาะน้ำมันได้ดินในอ่าวไทย เมื่อน้ำมันถูกสูบออกหมดแล้วโครงสร้างของดินที่อยู่ด้านล่างย่อมเกิดการหลวม และไร้เสถียรภาพ น้ำหนักของดินและน้ำทะเลที่อยู่ด้านบนที่กดทับอยู่ เมื่อมีการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวบริเวณใกล้เคียง เช่นที่สุมาตราที่มีขนาดใหญ่พอ ก็จะทำให้เกิดการยุบตัวลง ทำให้เกิดเป็นคลื่นสึนามิได้ ดังรูปที่ 34 และใช้เวลาเคลื่อนเข้าสู่ชายฝั่งประมาณ 1 ชั่วโมง 20 นาที

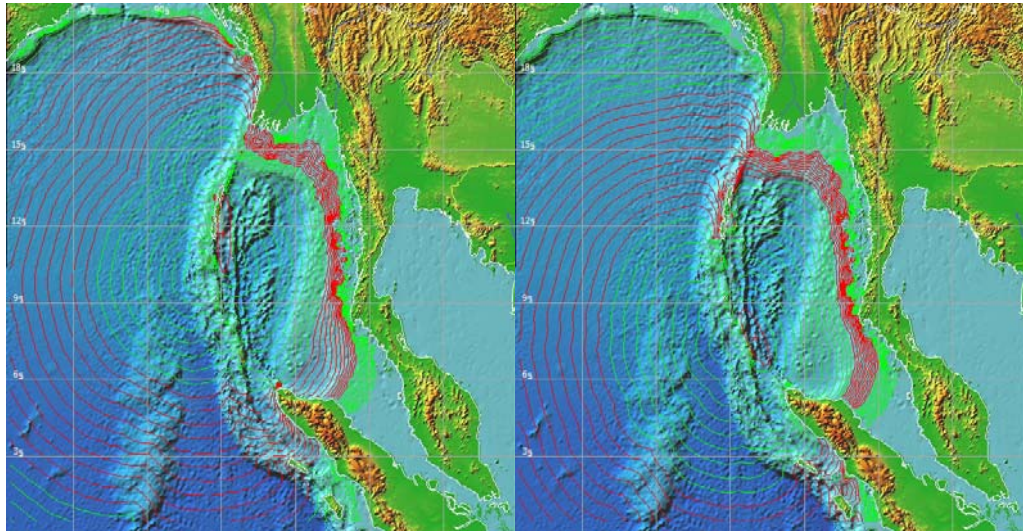


รูปที่ 34 โอกาสเกิดคลื่นสึนามิบริเวณอ่าวไทย จากแหล่งจุดเจ้าน้ำมัน 1 วงลึกคือ 1 ชั่วโมง (เส้นละ 5 นาติ)
(ที่มา: จากโมเดล WinITDB-(ITDB1))

นอกจากนี้จากการประมวลผลแบบจำลอง พบว่าหากแหล่งกำเนิดคลื่นสึนามิบริเวณหมู่เกาะอันดามัน คลื่นสึนามิจะมาถึงจังหวัดภูเก็ตเป็นจุดแรกภายในเวลา 1 ชั่วโมง 28 นาที และ จังหวัดระนอง 2 ชั่วโมง 21 นาที และถ้าแหล่งกำเนิดคลื่นสึนามิอยู่บริเวณหมู่เกาะนิโคบาร์ คลื่นสึนามิจะมาถึงจังหวัดภูเก็ตเป็นจุดแรกภายในเวลา 1 ชั่วโมง 19 นาที และ จังหวัดระนอง 2 ชั่วโมง 24 นาที และหากเกิดจากแผ่นดินถล่มบริเวณนอกฝั่งจังหวัดระนอง คลื่นสึนามิจะมาถึงจังหวัดภูเก็ตเป็นจุดแรกภายในเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และ จังหวัดระนอง 1 ชั่วโมง 13 นาที ซึ่งนับว่ามีเวลาน้อยมาก เมื่อเทียบกับคลื่นสึนามิด้านอ่าวไทยที่มีแหล่งห่างไกลนอกอ่าวไทย ดังรูปที่ 34 ดังนั้น รัฐบาลควรร่วมมือกับภาคเอกชนหรือทุกส่วนที่มีส่วนเกี่ยวข้อง แม้กระทั่งประชาชนในพื้นที่ ที่อยู่ใกล้ทะเลอันดามัน ให้เพิ่ม การศึกษา เพิ่มความตระหนัก และหาทางป้องกันการเกิดภัยพิบัติจากคลื่นสึนามิ โดยการส่งเสริม สนับสนุน ให้มีการเพิ่มพื้นที่ปลูกป่าชายเลน สร้างระบบการอพยพ ผู้ที่ปลอดภัยตลอดจน หมั่นทบทวนฝึกซ้อมการอพยพประชาชนอย่างสม่ำเสมอ

การเพิ่มพื้นที่ป่าชายเลน นอกจากสามารถลดความรุนแรง ลดความสูงของ Run-up และ Inundation ของคลื่นสึนามิแล้วทั้งช่วงที่คลื่นโถมเข้า และช่วงที่คลื่นกำลังถอยออก ยังช่วยด้านสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศทางทะเล อีกทั้งยังสามารถ

พื้นที่เสี่ยงจากคลื่นสึนามิ ในบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันตกนั้น สรุปได้ว่า พื้นที่ที่เคยได้รับผลกระทบจากการเกิดคลื่นสึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2004 นั้น ปัจจุบัน ยังถือเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงอยู่เหมือนเดิม แต่หากชุมชนได้รับการป้องกัน ตามที่กล่าวไว้ในเบื้องต้น โอกาสที่จะเกิดความเสียหายร้ายแรงแก่ชีวิตและทรัพย์สินก็จะลดลงเป็นอย่างมาก ดังนั้น แผนที่แสดงเขตพื้นที่เสี่ยงภัยที่ได้รับการศึกษาและจัดทำโดยหน่วยราชการอื่น จึงสอดคล้องกับที่ประเมิน ดังรูปที่ 35



(ก)

(ข)

รูปที่ 35 เวลาที่คลื่นสึนามิ จากแหล่งกำเนิดคลื่นที่หมู่เกาะอันดามัน(ก) และหมู่เกาะนิโคบาร์(ข) มาถึงประเทศไทย
(ที่มา: จากโมเดล WinITDB-(ITDB1))

บรรณานุกรม

- สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา ภูมิศาสตร์กายภาพ, 2543. กรมอุตุนิยมวิทยา
- อับสรสุดา ศิริพงศ์ และคณะ, 2548. การศึกษาและประเมินความเสี่ยงอันเกิดจากภัยพิบัติคลื่นยักษ์สึนามิ และให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับระบบติดตามและระบบป้องกันภัยสึนามิ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ดร. ปราโมทย์ ไชยสุกร และคณะ, 2548 แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของคลื่นสึนามิเมื่อเข้าสู่ชายฝั่งประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองของ NOAA/PMEL, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Bryant, E. 1991. Natural Hazards, N.Y. USA
- Iida, K. 1963a. A relation of earthquake energy to tsunami energy and the estimation of the vertical displacement in a tsunami source, J. Earth Sci., Nagoya Univ. 7: 49-67.
- 1963b. Magnitude, energy and generation mechanisms of tsunamis and catalogue of earth-quake associated with tsunamis, p.7-18, In D.C Cox(ed.) Proc. Tsunami meetings associated 10th Pac. Sci. Congr., Honolulu, Hawaii, Union Geod, Geophys. Monogr. 24.
- Imamura, A. 1934. Past tsunamis of the Sanriku coast, Japan. J. Astron. Geophys. 11:79-93, DRCR.
- National Geophysical Data Center and World Data Center A for Solid Earth Geophysics, 1998, and Intergovernmental Oceanographic Commission, 1999
- Stephen A. Nelson, Fall 2004. Earth & Environmental Sciences 211 EARTH MATERIALS, Sciences Tulane University New Orleans
- Sretenskiy, L. 1941. Concerning waves on the surface of a viscous fluid. Tr. Tsentr. Aerol. Gidrodinam 541:1-34 (In Russian)
- Takahasi, R. 1934. A model experiment on the mechanism of seismic sea wave generation. Part I. Bull. Earthquake Res. Inst. 12:152-178

Website

<http://www.gistda.or.th/>
<http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/index.htm>
www.onep.go.th/projects/rock/images/mapso.gif
<http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?Aid=267>
<http://www.enhantedlearning.com/subject/tsunami/label/hittingcoast/>
<http://www.tsunami.org/map46.htm>
<http://www.cmo.nl/pe/pe27/immage/ptwc>
<http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/index.html>
<http://www.ess.washington.edu/tsunami>
<http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/bulletin.html>