

การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction)

1. กล่าวนำ

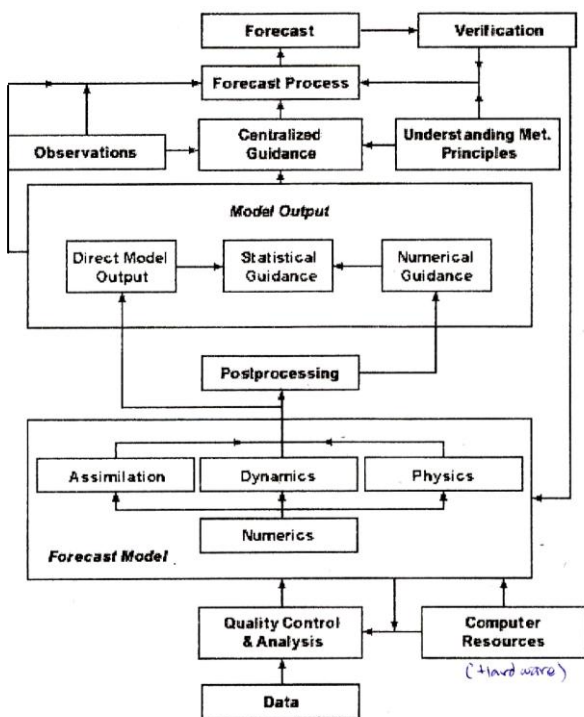
การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction, NWP) คือ การคาดหมายลักษณะของลมฟ้าอากาศ โดยอาศัยสมการทาง Hydrodynamic และ Thermodynamic ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ สมการเหล่านี้จะรวมกันเป็นระบบสมการที่สมบูรณ์ เพื่อใช้ในการพยากรณ์อากาศเรียกว่าแบบจำลอง (Model) โดยจะบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาต่างๆ เช่น ลม ความกดอากาศ อุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในอากาศ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของลมฟ้าอากาศ (ดร.ดุชฎี ศุขวัฒน์)

2. องค์ประกอบของแบบจำลอง (Model Component)

การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ ดังนี้ (Holton, 1979)

- 1) สภาพะเริ่มแรกของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 2) ระบบสมการสำหรับการพยากรณ์ที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ
- 3) วิธีการที่จะแก้สมการเพื่อให้ทราบสถานะของตัวแปรต่างๆ ในอนาคต

เนื่องจากมีปริมาณข้อมูลจำนวนมาก และต้องใช้วิธีการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อนในการแก้สมการต่างๆ ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข จึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่และมีความเร็วสูงในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข ความถูกต้องของผลการพยากรณ์อากาศจากแบบจำลอง เป็นผลจากกระบวนการประมวลผลที่สลับซับซ้อนอันประกอบด้วย การพิจารณาอย่างรอบคอบของแหล่งที่มาของข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจำนวนมาก กฎเกณฑ์ต่างๆ ทางอุตุนิยมวิทยา และแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นองค์ประกอบต่างๆ ของแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขที่ถูกจัดวางลงในกระบวนการของการพยากรณ์อากาศ



รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของ NWP ในกระบวนการของการพยากรณ์อากาศ

2.1 ข้อมูล (Data)

เพื่อให้ทราบถึงสถานะเริ่มแรกของบรรยากาศ จึงต้องมีการรวบรวมข้อมูลซึ่งมีแหล่งที่มาจากการตรวจอากาศผิวพื้น ภาพถ่ายดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา ผลการตรวจอากาศด้วยเรดาร์ ผลการตรวจอากาศชั้นบน หรือการตรวจอากาศด้วยอากาศยาน

2.2 การควบคุมคุณภาพและการวิเคราะห์ข้อมูล (Quality Control and Analysis)

คือ กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่จะนำเข้าสู่แบบจำลอง รวมทั้งข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนให้ได้รับการปรับแก้หรือตัดทิ้งไป ในส่วนนี้แก่อุตุนิยมวิทยามีส่วนสำคัญอย่างมาก

2.3 ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ (Computer Resource)

ความจุของหน่วยความจำ และความเร็วในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณผลจากแบบจำลองอันประกอบด้วยข้อมูลจำนวนมหาศาลและมีความซับซ้อน ตลอดจนแบบจำลองที่นำมาใช้จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถภาพสูง ด้วยเหตุนี้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญและเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข

2.4 แบบจำลองการพยากรณ์อากาศ (Forecast Model)

แบบจำลองการพยากรณ์อากาศประกอบด้วย สิ่งที่เป็นต่อการคำนวณสถานะเริ่มแรกของบรรยากาศ และการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาพื้นฐานในเชิง 3 มิติ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

2.4.1 แบบจำลองเชิงตัวเลข (Numeric)

แบบจำลองเชิงตัวเลขหมายถึงสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- สูตรทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการแก้สมการ
- ข้อมูลที่เป็นตัวแทนนำเข้าสู่ระบบ
- ความละเอียดของแบบจำลอง (Model Resolution)
- ผลการประมวลผลของ Domain
- ระบบพิกัดอ้างอิง (Coordinate System)

2.4.2 Assimilation System

คือ กระบวนการที่ซับซ้อนในการพิจารณาค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นตัวแปรที่จะใช้ในการพยากรณ์และผนวกเข้ากับการพยากรณ์ระยะสั้น ที่ได้จากการประมวลผลของแบบจำลองที่ผ่านมา เพื่อที่กำหนดสถานะเงื่อนไขเริ่มแรกก่อนที่จะทำการพยากรณ์ในครั้งใหม่ ระบบ Assimilation จะค้นหาสถานะเริ่มแรกของแต่ละตัวแปรที่จะใช้ในการพยากรณ์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของความถูกต้องของการพยากรณ์โดยอยู่บนฐานของข้อมูลต่างๆ ที่มีอยู่

2.4.3 กระบวนการกระทำโดย Dynamics และ Physics

กระบวนการทาง Dynamics ในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข หมายถึง กระบวนการของบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับแรงหรือการเคลื่อนที่ของอากาศ เช่น Advection, Pressure Gradient Force, และ Adiabatic Heating & Cooling โดยอธิบายในลักษณะของ Horizontal และ Vertical Momentum, กฎการอนุรักษ์ของมวลและสมการทาง Thermodynamic ที่มีอยู่ในแบบจำลอง

สำหรับกระบวนการทาง Physics ในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข แบ่งออกได้ 3 อย่างคือ

- 1) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสเกลที่เล็กกว่าความละเอียดของ แบบจำลองแต่ผลที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการประมวลผลของแบบจำลอง
- 2) การแลกเปลี่ยนพลังงาน น้ำและโมเมนตัม ระหว่างบรรยากาศและแหล่งพลังงานภายนอก เช่น การแผ่รังสี, กระบวนการต่างๆ ที่เกิดเหนือพื้นดินและพื้นน้ำ
- 3) เมฆและไมโครฟิสิกส์ของน้ำฟ้า

2.5 Postprocessing

คือ การประมวลผลภายหลังจากที่ได้ผลลัพธ์จากแบบจำลองในครั้งแรกให้อยู่ในรูปแบบที่นักพยากรณ์อากาศสามารถนำไปใช้ได้ ค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ทางอุตุนิยมวิทยาที่ปรากฏ คำนวณจากตัวแปรที่ใช้ในการพยากรณ์ และจะ Interpolate ทั้งในแนวตั้ง เช่น Isobaric, Isentropic และ Constant Altitude และในแนวระนาบด้วยเพื่อใช้พยากรณ์ ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง หรืออยู่ในรูปของกริด นอกจากนี้ยังมีรูปแบบของเส้น Contour ผลรวมของผลลัพธ์ที่แสดงกล่าวมาแล้วทั้งหมดรวมเรียกว่า Numerical Guidance

2.6 ผลลัพธ์ของแบบจำลอง (Model Output)

คือ ผลผลิตทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลอง ค่าตัวแปรต่างๆ จากแบบจำลองการพยากรณ์แสดงผลได้โดยตรงหรือในขั้น Postprocessing, รูปแบบของกริด, การพยากรณ์รายสถานี (Station Predictions) และอาจใช้ร่วมกับข้อมูลภูมิอากาศหรือแหล่งข้อมูลสถิติอื่นๆ ที่เชื่อถือได้ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ถือเป็นสิ่งสำคัญของกระบวนการพยากรณ์ (Forecast Process) Model Output ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

2.6.1 Direct Model Output

ประกอบด้วยข้อมูลที่พยากรณ์ที่ได้จากแบบจำลองตามจุดกริดต่างๆ ทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง สำหรับพื้นที่ที่อยู่ระหว่างจุดกริดจะไม่มีการ Interpolate ข้อมูล นักพยากรณ์อากาศใช้ข้อมูลตามจุดกริดเหล่านี้เพื่อการพยากรณ์อากาศในท้องถิ่น และยังตรวจสอบผลการพยากรณ์จากแบบจำลองว่าใกล้เคียงกับสภาพอากาศที่เกิดขึ้นจริงเพียงใด

2.6.2 Statistic Guidance

สารประกอบทางอุตุนิยมวิทยาบางอย่าง เช่น ทิศนวิสัยและพายุฟ้าคะนอง ไม่สามารถที่จะพยากรณ์จากแบบจำลองหรือไม่สามารถคำนวณได้จากค่าตัวแปรที่แบบจำลองพยากรณ์ได้โดยตรงรวมทั้งตัวแปรอื่นๆ เช่น อุณหภูมิสูงสุดที่ผิวพื้น ซึ่งสิ่งนี้เป็นจุดอ่อนของแบบจำลองและผันแปรไปตามท้องถิ่นต่างๆ เทคนิคทางสถิติ เช่น Model Output Statistics (MOS) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นจาก Direct Model และ Postprocessed Model และข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องโดยตรง ตลอดจนข้อมูลสถิติภูมิอากาศมาเพื่อใช้ในการพยากรณ์สารประกอบที่เกิดขึ้นเฉพาะถิ่น

2.6.3 Numerical Guidance

คือ ผลที่ได้จากกระบวนการ Postprocessing ซึ่งอยู่ในส่วนของ Model Output เป็นรูปแบบที่นักพยากรณ์อากาศสามารถนำไปใช้ โดยทั่วไปแสดงในลักษณะของกริดซึ่งมีรายละเอียด ที่แตกต่างไปจากแบบจำลองที่ประมวลผลในครั้งแรก ตัวอย่างเช่น แผนที่อากาศ Geopotential Height แผนที่อากาศผิวพื้นที่แสดงค่าความกดอากาศ ณ ระดับน้ำทะเลปานกลาง และอุณหภูมิที่ผิวพื้นเป็นต้น ส่วนแผนที่อากาศที่แสดงบริเวณกระแส

อากาศปั่นป่วนและน้ำแข็งเกาะเครื่องบินก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการคำนวณจากผลผลิตของแบบจำลอง (Numerical Model Output) โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางกายภาพที่ฟังจะเป็นไปได้

2.7 Centralized Guidance

คือ ส่วนที่ใช้เป็นเครื่องช่วยในการพยากรณ์อากาศอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นที่รวมความคิดเห็นของนักอุตุนิยมวิทยาที่มีประสบการณ์สูงที่วิพากษ์วิจารณ์ เช่น การพยากรณ์เส้นทางเดินพายุ การแจ้งเตือนสภาพอากาศรุนแรง และการพยากรณ์ปริมาณน้ำฟ้า เป็นต้น นักพยากรณ์อากาศอาจใช้ประโยชน์จากสิ่งเหล่านี้มาผสมผสานกับการพยากรณ์อากาศที่ได้จากแบบจำลอง

2.8 Observation

การตรวจอากาศทุกชนิดเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างมาก เพราะจะทำให้ทราบถึงสภาวะเงื่อนไขของสภาพอากาศปัจจุบันและประเมินความถูกต้องของ ผลการวิเคราะห์หรือการพยากรณ์จากแบบจำลอง ผลการตรวจอากาศยังใช้ตรวจสอบสภาพความเป็นจริงของข้อมูลและทำให้ทราบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและสิ่งที่ได้สามารถที่จะนำไปปรับค่าข้อมูลที่จะนำเข้ามาประมวลผลในครั้งต่อไป

2.9 Understanding Meteorological Principle (ความเข้าใจในกฎเกณฑ์ทางอุตุนิยมวิทยา)

ความเข้าใจกฎเกณฑ์พื้นฐานทางอุตุนิยมวิทยาและความสัมพันธ์ของกฎเกณฑ์ต่างๆ นั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้การเลือกใช้แบบจำลองเป็นไปอย่างชาญฉลาด ตัวอย่างเช่น การพิสูจน์ทราบว่าผลการพยากรณ์ของแบบจำลองเป็นไปอย่างไม่สมเหตุสมผล หรือในกรณีที่ผลของแบบจำลองพยากรณ์ออกมาค่อนข้างซับซ้อนหรือมีความหลากหลาย ซึ่งล้วนแล้วแต่มีโอกาasเป็นไปได้นั้น ความเข้าใจดังกล่าวจะมีความจำเป็นมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อช่วยให้การเลือกผลการพยากรณ์ ที่มีโอกาสเป็นไปได้อย่างมากที่สุดและเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดอันจะเกิดขึ้นด้วย นอกจากนี้ความรู้เกี่ยวกับภูมิอากาศท้องถิ่น อิทธิพลของสภาพภูมิประเทศและประสิทธิผลของแบบจำลองที่พยากรณ์ในบริเวณนี้ก็มีส่วนช่วยในการเลือกใช้แบบจำลองและยังนำไปพัฒนาผลการพยากรณ์โดยแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.10 Forecast Process (กระบวนการการพยากรณ์)

ในส่วนนี้คือการนำผลการพยากรณ์จากแบบจำลองและผลการตรวจอากาศปัจจุบัน และความเข้าใจกฎเกณฑ์พื้นฐานทางอุตุนิยมวิทยา มาใช้ร่วมกันเพื่อพัฒนาผลการพยากรณ์ในพื้นที่ที่รับผิดชอบในการพยากรณ์ ข้อมูลจาก Centralize Subjective Guidance เป็นเครื่องช่วยอีกอย่างหนึ่งในการที่จะก่อให้เกิดมุมมองใหม่ๆ ในการพยากรณ์อากาศ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่ต้องการพยากรณ์และความต้องการของผู้ใช้แบบจำลองเป็นตัวบ่งชี้แนวทางของการพยากรณ์ของแบบจำลอง ส่วนผลการสังเกตก็ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา

2.11 Forecast (คำพยากรณ์)

คือ ผลผลิตขั้นสุดท้ายสำหรับแบบจำลองที่ได้รับการปรับแต่งในท้ายที่สุด เช่น รูปแบบของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ห้วงเวลาพยากรณ์และความถี่ในการพยากรณ์เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้มากที่สุด

2.12 Verification

นักพยากรณ์อากาศตรวจสอบผลการพยากรณ์ของแบบจำลอง เพื่อค้นหาข้อจำกัดบางประการของแบบจำลอง หรือการลำเอียงของแบบจำลอง เพื่อทำการแก้ไขหรือชดเชยความบกพร่อง ดังกล่าว นักสร้างแบบจำลองใช้การ Verification ในการค้นหาและนำไปพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองต่อไป

3. ประวัติ

ความคิดเกี่ยวกับการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข เริ่มจากนักอุตุนิยมวิทยาชาวสวีเดน Vihelm Bjerkness (ค.ศ.1862-1951) โดยเขาได้แสดงให้เห็นว่าการพยากรณ์อากาศโดยการประยุกต์หลักการทางอุตุนิยมวิทยา ไดนามิกส์นั้น ต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญคือข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะอากาศปัจจุบันที่ถูกต้องและความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกฎเกณฑ์ในการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ Bjerkness ตระหนักดีว่าเงื่อนไขยังไม่อาจเป็นจริงได้ในสมัยนั้น เพราะการตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยายังมีน้อยมากในสมัยนั้นถึงแม้ว่าบรรยากาศถือได้ว่าเป็นระบบทางฟิสิกส์แต่สภาวะของลมฟ้าอากาศนั้นซับซ้อนมาก และยากที่จะบรรยายกระบวนการของบรรยากาศในเชิงปริมาณ (Quantitative) ได้

ระหว่าง ค.ศ.1911 ถึง 1918 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Lewis Fry Richardson (1881-1953) ได้คิดค้นวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำการพยากรณ์อากาศ และได้ลงมือทำการคำนวณโดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในสมัยนั้น แต่ผลการพยากรณ์อากาศของเขาผิดพลาดจากความเป็นจริงมาก อย่างไรก็ตามถือได้ว่าเขาประสบความสำเร็จในการที่ได้คิดค้นเกี่ยวกับวิธีการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขเป็นครั้งแรก และได้วางแนวทางในการแก้ปัญหาเหล่านั้นไว้ด้วย ไม่มีผู้ใดพยายามทำการพยากรณ์อากาศด้วยวิธีการทางอุตุนิยมวิทยาด้วยวิธีการทางอุตุนิยมวิทยาไดนามิกส์อีกเลยเป็นเวลานาน หลักจากการทดลองที่ไม่ประสบความสำเร็จของ Richardson การที่ต้องทำการคำนวณอย่างมหาศาลเพื่อแก้ระบบสมการที่เกี่ยวข้องเป็นสิ่งที่ยากลำบากมากในยุคนั้น Richardson ได้เขียนไว้ใน ค.ศ.1922 ว่า “บางทีสักวันหนึ่งในอนาคตอันห่างไกล อาจจะเป็นไปได้ที่จะสามารถทำการคำนวณได้อย่างรวดเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงของลมฟ้าอากาศโดยเสียค่าใช้จ่ายน้อยและคุ้มค่ากับผลที่จะได้รับ แต่นั่นเป็นเพียงความฝันเท่านั้น”

ในตอนกลางของคริสต์ทศวรรษ 1940 John Von Neumann แห่ง The Institute for Advanced Study ของ Princeton University ได้พิจารณาเห็นว่าปัญหาของการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขเป็นปัญหาทางฟิสิกส์ที่ซับซ้อนที่สุด แต่สามารถที่จะดำเนินการได้ และระบบสมการที่เกี่ยวข้องต้องใช้เครื่องคำนวณที่เร็วที่สุดทำการคำนวณเป็นเวลานานมาก ณ สถาบันแห่งนี้กลุ่มวิจัยด้านอุตุนิยมวิทยาได้ถูกจัดตั้งขึ้นภายใต้การนำของ Jule Charney เพื่อแก้ปัญหาด้านการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข และในปี ค.ศ.1950 คณะวิจัยได้ประสบความสำเร็จในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขเป็นครั้งแรก โดยใช้คอมพิวเตอร์เครื่องแรกของโลกคือ ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Calculator) นับได้ว่าเป็นการเริ่มต้นยุคแห่งการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการประสบความสำเร็จของการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ นั้น ดูเหมือนจะเนื่องมาจากความรู้ความเข้าใจในความแตกต่างกันของระบบการเคลื่อนที่ของอากาศขนาดต่างๆ ซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการควบคุมระบบลมฟ้าอากาศนอกจากนี้การดัดแปลงระบบสมการพื้นฐานทาง Hydrodynamics ที่ใช้ในการพยากรณ์อากาศให้ง่ายขึ้นโดยใช้หลักของการประเมินความสำคัญของการเคลื่อนที่ของบรรยากาศในขนาดต่างๆ และขจัดขนาดของการเคลื่อนที่ซึ่งมีความสำคัญน้อยออกไปจากระบบสมการ เพื่อการพยากรณ์อากาศก็มีส่วนทำให้การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขประสบความสำเร็จเช่นกัน

การเคลื่อนที่ของอากาศในแนวระดับสำหรับระบบการเคลื่อนที่ขนาดใหญ่ นั้น จะมีทิศทางขนานกับเส้นความกดอากาศเท่า (Isobar) ในทิศทางตามเข็มนาฬิการอบบริเวณความกดอากาศสูงและในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา รอบบริเวณความกดอากาศต่ำในซีกโลกเหนือ และในทิศตรงกันข้ามในซีกโลกใต้ แรงกดอากาศ (Pressure Force) มีทิศตั้งฉากกับเส้นความกดอากาศเท่า และมีทิศจากความกดอากาศสูงไปยังความกดอากาศต่ำ และโดยประมาณ

แรงนี้จะสมดุลกับ Coriolis Force ซึ่งเป็นแรงปรากฏ (Apparent Force) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก สภาวะสมดุลระหว่างแรงกดอากาศและ Coriolis Force นี้เรียกว่าเป็นการสมดุลแบบ Quasi-Geostrophic

ใน ค.ศ.1954 National Meteorological Center ของสหรัฐอเมริกา ได้เริ่มใช้การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขเพื่อคาดหมายลักษณะลมฟ้าอากาศ ในทศวรรษ 1950 แบบจำลอง (Model) เพื่อการพยากรณ์อากาศใช้หลักการของการประมาณค่าแบบ Quasi-Geostrophic แต่หลักจากนั้นไม่นานผลการปฏิบัติการและการทดลองแสดงให้เห็นว่า Quasi-Geostrophic Model ไม่อาจจำลองสภาพของบรรยากาศได้ดีนัก ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดบางประการของสมมุติฐาน Quasi-Geostrophic ในส่วนที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ขนาดใหญ่ของอากาศ แรงเสียดทานและแหล่งพลังงานความร้อน

ระหว่าง ค.ศ.1960-1970 การใช้แบบจำลองที่ไม่ใช้สมมุติฐาน Quasi-Geostrophic คือ แบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับสภาพที่แท้จริงของบรรยากาศมากกว่า หรือที่เรียกว่า Primitive Equation Model ทำให้ผลการพยากรณ์อากาศดีขึ้นมาก แบบจำลองชนิดนี้ประกอบด้วยข้อจำกัดทาง Dynamic ที่น้อยกว่าแบบจำลองชนิด Quasi-Geostrophic แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันนี้เนื่องจากคอมพิวเตอร์มีความเร็วและความจุเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งมีความก้าวหน้าในเทคนิคของวิธีการเชิงตัวเลขในการแก้สมการต่างๆ จึงเป็นผลให้การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขในปัจจุบันใช้แบบจำลองชนิด Primitive Equation ทั้งหมด

ด้วยความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขสำหรับระบบลมฟ้าอากาศขนาดใหญ่ ในปัจจุบันนี้การพยากรณ์จึงเริ่มมุ่งไปที่การคาดหมายลักษณะอากาศสำหรับระบบลมฟ้าอากาศขนาดกลางและขนาดเล็ก ควบคู่ไปกับพัฒนาการในด้านแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์อากาศทุกขนาดก็คือความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ รวมทั้งสมรรถนะที่สูงขึ้นของเครื่องมือตรวจอากาศที่ช่วยให้ทำการตรวจได้ละเอียดขึ้นกว่าแต่ก่อน ทำให้การพยากรณ์อากาศทุกประเภทมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

4. สมการพื้นฐาน

สมการที่ใช้ในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขจะเกี่ยวข้องกับ การเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ อันประกอบด้วย

1. กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (Newton's Second Law Motion)
2. กฎการอนุรักษ์มวลสาร (The Law of Conservation of Mass)
3. สมการของสถานะ (The Equation of State)
4. กฎข้อที่หนึ่งของพลศาสตร์ความร้อน (The First Law of Thermodynamics)
5. สมการการอนุรักษ์ของน้ำ (The Conservation Equation for Water Substance)

5. แบบจำลองเชิงตัวเลขของบรรยากาศ (Atmospheric Numerical Model)

การเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศนั้นซับซ้อนมาก จนเป็นไปได้ที่จะสร้างสมการที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ทุกประการ ดังนั้นจึงต้องมีการดัดแปลงคุณสมบัติบางประการของบรรยากาศให้มีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยลง (Simplified) โดยใช้สมมุติฐานต่างๆ ทางอุณหพลศาสตร์ บรรยากาศที่ถูกดัดแปลงคุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า Modified Atmosphere และระบบสมการที่ใช้บรรยายคุณสมบัติของบรรยากาศนี้เรียกว่า แบบจำลองเชิงตัวเลขของบรรยากาศ (Atmospheric Numerical Model)

การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction) คือการคาดหมายลักษณะอากาศในอนาคตของ Modified Atmosphere โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขของบรรยากาศนั่นเอง แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการพยากรณ์อากาศแบ่งอย่างกว้างๆ ได้เป็น 2 ประเภท คือ Filtered Model และ Primitive Equation Model

5.1 Filtered Model

การเคลื่อนที่อันซับซ้อนของบรรยากาศ สามารถจำแนกออกเป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะของคลื่น (Wave) 3 ชนิด คือ คลื่นเสียง (Sound Wave) คลื่นความโน้มถ่วง (Gravity Wave) และ Rossby Wave จากความรู้ทางอุตุนิยมวิทยาไดนามิกส์ทำให้ทราบว่า Vertical Sound Wave นั้นไม่มีความสำคัญในทางอุตุนิยมวิทยา และสามารถจัดออกไปจากแบบจำลองได้โดยใช้ Hydrostatics Equilibrium ส่วน Gravity Wave และ Horizontal Sound Wave นั้น สามารถจัดออกไปได้โดยใช้สมมุติฐาน Non divergence หรือ Geostrophic Approximation

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของบรรยากาศในขนาดใหญ่มีแต่เพียง Rossby Wave เท่านั้นที่มีความสำคัญต่อการพยากรณ์อากาศ ส่วน Gravity Wave และ Sound Wave เป็นเพียง Noise เท่านั้น โดยหลักการนี้จึงมีแบบจำลองที่ขจัด Gravity Wave และ Sound Wave ออกไปจากระบบสมการเพื่อการพยากรณ์อากาศแบบจำลองชนิดนี้เรียกว่า Filtered Model และใช้กันอย่างแพร่หลายในระหว่างคริสต์ทศวรรษ 1950–1960

5.2 Primitive Equation Model

โดยความเป็นจริงแล้ว Filtered Model ไม่อาจพยากรณ์อากาศได้ดีนัก ทั้งนี้เพราะบรรยากาศจริงๆ นั้นไม่ได้เป็น Geostrophic Equilibrium อยู่ตลอดเวลา ดังนั้น นักอุตุนิยมวิทยาจึงได้กลับไปใช้ระบบสมการดั้งเดิมที่ไม่ได้มีการตัดแปลงนั้นคือ Primitive Equation Model ตั้งแต่ คริสต์ทศวรรษ 1960 เป็นต้นมาจนถึงปัจจุบันนี้

ใน Primitive Equation Model การแปรเปลี่ยนของตัวแปรทั้งหมดนั้น สามารถกำหนดได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการพยากรณ์อากาศโดยแบบจำลองชนิดนี้มีจุดอ่อนที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรกระบบสมการที่ใช้ได้รวมเอา Gravity Wave ซึ่งมีความเร็วสูงเอาไว้ด้วย จึงต้องใช้ช่วงเวลา (Time Interval) สำหรับการ Intergrate ในการพยากรณ์อากาศแต่ละช่วงเวลา (Step) สั้นมาก จึงปรากฏว่าในการพยากรณ์อากาศสำหรับระยะเวลาเดียวกัน (เช่น 24 ชั่วโมง) หากใช้ Primitive Equation Model จะต้องใช้เวลาของคอมพิวเตอร์มากกว่าการใช้ Filtered Model เป็นอย่างมาก จุดอ่อนประการที่สองของ Primitive Equation Model คือ Numerical Solution มีความไว (Sensitivity) ต่อความคลาดเคลื่อน (Error) และการผันแปรขนาดเล็ก (Small Scale Fluctuation) ของข้อมูลเริ่มแรก (Initial Data) เป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวกับลม ด้วยเหตุนี้การจัดเตรียมข้อมูล (Initialization) เพื่อใช้กับแบบจำลองชนิดนี้จึงมีความยุ่งยากกว่าการจัดเตรียมข้อมูลสำหรับ Filtered Model เป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตาม พัฒนาการด้านทฤษฎีทางอุตุนิยมวิทยา วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข และวิทยาการด้านคอมพิวเตอร์ได้ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้มาก ดังนั้น ตั้งแต่ทศวรรษ 1970 เป็นต้นมา การใช้ Primitive Equation Model ในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขจึงเป็นที่แพร่หลายโดยทั่วไป

6. ขั้นตอนในการดำเนินงานเพื่อการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข

พฤติกรรมของบรรยากาศอยู่ภายใต้กฎทางฟิสิกส์และแสดงด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ สมการเหล่านี้ใช้คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรของบรรยากาศ (อุณหภูมิ, ความกดอากาศ) ที่จะเกิดขึ้นนับต่อจากปัจจุบัน ดังนั้นถ้าเราแก้สมการได้อย่างถูกต้องแท้จริง เราจะได้รายละเอียดของสถานะของบรรยากาศในอนาคตได้ ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของสถานะเริ่มแรก ต่อจากนั้นเราแปลผลจากการแก้สมการเหล่านั้นในรูปแบบของสภาพอากาศ เช่น น้ำฟ้า อุณหภูมิ จำนวนเมฆปกคลุม ความกดอากาศและลม แต่เนื่องจากสมการเหล่านี้มีความซับซ้อนและเป็นสมการแบบ Non Linear การแก้สมการจึงเป็นการยากที่จะทำได้อย่างสมบูรณ์ที่จะได้ค่าในอนาคต ดังนั้นเทคนิคแบบจำลองเชิงตัวเลขจึงให้ค่าการแก้สมการโดยประมาณเท่านั้น

แบบจำลองเชิงตัวเลขเหล่านี้ ค่าตัวแปรทางอุณหภูมิจึงแทนค่าด้วย Finite set ในรูปแบบของสมการที่ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในแบบจำลอง เราสามารถคำนวณค่าตัวแปรของบรรยากาศในอนาคตโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณแบ่งได้ดังนี้

6.1 Discretization

ในขั้นตอนแรกคือการสร้างค่าตัวแทนของตัวแปรของบรรยากาศด้วยตัวเลข ในขั้นตอนนี้เรียกว่า “Discretization” ทั้งนี้เพราะเราแทนค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเพียงค่าเดียวในจุดพิคัดกริต ในขั้นนี้จะให้ความสนใจต่อขีดจำกัดของข้อมูลใกล้เคียง (Limits of the Numerical Approach) บริเวณที่ห่างไกลจากพิคัดกริตให้รายละเอียดของข้อมูลลดลงและสถานะของบรรยากาศในอนาคตค่อนข้างหยาบ หากกริดอยู่ใกล้กันมากขึ้นก็จะทำให้ค่าดีขึ้น ตัวอย่างเช่น หากเราพยายามที่แสดงค่าอุณหภูมิผิวพื้นเหนือพื้นที่สหรัฐอเมริกาโดยอาศัยเพียงผลการตรวจอากาศนับพันหน่วยก็ได้รายละเอียดระดับหนึ่ง แต่ถ้าเรามีผลการตรวจอากาศหลายล้านหน่วยในพื้นที่เดียวกัน เราย่อมได้รายละเอียดของอุณหภูมิดีกว่า

ในสถานะเริ่มแรก (Initial State) ของ NWP ได้ข้อมูลจากการวัดตัวแปรจากข่ายการตรวจอากาศที่ปกคลุมพื้นที่ภายในแบบจำลอง รวมทั้งข้อมูลที่ได้จาก Sensor ต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่ตามสถานีผิวพื้นเรือ, ทุ่นลอย, การตรวจอากาศชั้นบน, ดาวเทียม และอากาศยาน ในระบบการตรวจอากาศรวมทั้งข้อมูลอุณหภูมิจึงแลกเปลี่ยนระหว่างประเทศซึ่งใช้เป็นเครื่องช่วยในการปรับข้อมูล (Assimilation) หรือเรียกว่า Objective Analysis สถานีตรวจอากาศที่กระจัดกระจายอยู่ในพื้นที่ซึ่งมีระยะห่างกันไม่เท่ากัน จะถูกปรับเปลี่ยนเป็นตารางกริดในแบบจำลองการพยากรณ์อากาศด้วยวิธี Interpolation ซึ่งวิธีนี้ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในเงื่อนไขระยะเริ่มแรกของแบบจำลอง เพราะฐานของข้อมูลมิได้เป็นข้อมูลแท้จริงก่อนที่จะนำเข้าสู่แบบจำลอง ตัวอย่างเช่น ข้อมูลอุณหภูมิที่ Scott AFB และสนามบิน St.Louis Lambert ซึ่งอยู่ห่างกันถึง 40 ไมล์ทะเล แบบจำลองต้องการทราบอุณหภูมิของจุดพิคัดกริตที่อยู่ระหว่างสถานีทั้งสองเทคนิค Interpolation จะประมาณค่าอุณหภูมิ ณ จุดพิคัดกริตนั้น ซึ่งค่าประมาณที่ได้นั้นมิใช่ค่าที่แท้จริง แต่เป็นเพียงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงเท่านั้น ด้วยเหตุนี้หากมีจุดพิคัดกริตเพิ่มมากขึ้นความถูกต้องของแบบจำลองก็มีมากขึ้นเช่นเดียวกัน

6.2 กระบวนการ Optimal Interpolation (OI)

คือขั้นตอนถ่วงน้ำหนักของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น ในบางพื้นที่ที่มีการตรวจอากาศชั้นบน ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือมากกว่าข้อมูลดาวเทียม ข้อมูลในพิคัดกริตจะถูกถ่วงน้ำหนักข้อมูลโดยการอ้างข้อมูลผลการตรวจอากาศชั้นบน Optimal Interpolation ทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดีขึ้นและทำให้ผลการพยากรณ์จากแบบจำลองมีผลใกล้เคียงกับสภาพอากาศที่เกิดขึ้นจริง อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดอยู่เช่นกัน

โดยทั่วไปความต้องการที่จะทำให้ผลผลิตจาก Global Model มีรายละเอียดสูง (จุดพิกัดกริดหนาแน่น) แต่ข้อจำกัดเกี่ยวกับความสามารถของคอมพิวเตอร์ไม่สามารถที่จะกระทำได้ การที่จะทำให้แบบจำลองมีรายละเอียดเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มภาระในการประมวลผลให้กับคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้เรายังต้องการคอมพิวเตอร์ที่มีความจำเพิ่มขึ้น ตลอดจนการแก้สมการก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่แบบจำลองในปัจจุบันต้องการใช้เวลาเพียงสั้นๆ ในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์และให้ผลการพยากรณ์ครอบคลุมหลายวัน อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มรายละเอียดของจุดพิกัดกริดจะต้องเพิ่มเวลาในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์มากขึ้น แบบจำลองการพยากรณ์อากาศที่ใช้เวลาในการประมวลผล 24 ชั่วโมงเพื่อพยากรณ์อากาศภายใน 24 ชั่วโมงจึงไม่เป็นที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้รายละเอียดของจุดพิกัดกริดที่ใช้จึงต้องสอดคล้องกับทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

อย่างไรก็ตามปัจจุบันแนวทางในการแก้ไขในการประมวลผลแบบจำลองเพื่อให้ได้รายละเอียดที่สูงกว่าและใช้เวลาในการประมวลผลน้อยลง ซึ่งใช้แบบจำลองในลักษณะเชิงซ้อน (Model Nesting) โดยใช้แบบจำลองที่มีรายละเอียดสูงกว่าและครอบคลุมพื้นที่ที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนลงไป Global Model ซึ่งมีพื้นที่ใหญ่กว่า แบบจำลองที่ซ้อนอยู่ภายในจะรับค่าตัวแปรต่างๆ ของบรรยากาศอันเป็นเงื่อนไขที่อยู่ภายในบริเวณนั้นโดยอ้างอิงจากแบบจำลองที่ครอบคลุมพื้นที่ใหญ่กว่า ตัวอย่างเช่น เมื่อเราประมวลผลแบบจำลองที่มีรายละเอียดสูงกว่าในพื้นที่ที่ครอบคลุมประเทศสหรัฐอเมริกาเราจำเป็นต้องประมวลผลโดยใช้ผลการพยากรณ์ของตัวแปรต่างๆ ที่สร้างขึ้นโดย Global หรือ Hemispheric Model นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มรายละเอียดของแบบจำลองให้สูงขึ้นโดยซ้อนอยู่ภายในได้อีก

เหตุผลหนึ่งในการประมวลผลแบบจำลองที่มีรายละเอียดสูง (Fine Scale Model) คือ เราสามารถที่จะจำลองกระบวนการที่สำคัญทั้งหมดในบรรยากาศซึ่งไม่สามารถประมวลผลได้ใน Global Scale แม้แต่แบบจำลองที่มีรายละเอียดสูงกว่าก็ยังไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาของปรากฏการณ์ เช่น กระแสอากาศปั่นป่วน หรือ การก่อตัวและการเจริญเติบโตของเมฆและอนุภาคของน้ำฟ้าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของจุดพิกัดกริดได้ ในการที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการหนึ่งๆ ที่เรียกว่า Parameterization

Parameterization คือ ขั้นตอนในการคำนวณที่รวมเอาผลกระทบที่เกิดขึ้นในกริดย่อย (Sub Grid Scale) โดยนำค่าตัวแปรภายในกริดนั้นมาประมวลผล Parameterization ใช้อธิบายกระบวนการซึ่งเกิดขึ้นใน Scale ที่มีขนาดเล็กกว่าซึ่งไม่สามารถคำนวณได้ทั้งในเชิงพื้นที่และเวลา (Spatial and Temporal) ผลจากรายละเอียดของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง Parameterization จึงเป็นที่ต้องการเพราะกระบวนการต่างๆ ทางอุตุนิยมวิทยาได้ถูกนำมาพิจารณาเพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์บางอย่างได้ถูกอธิบาย เช่น การแลกเปลี่ยนพลังงานในบรรยากาศ (การคายความร้อนแฝง, กระบวนการแผ่รังสี) ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้มีอิทธิพลต่อกระบวนการยกตัวของอากาศ จำนวนของค่าต่างๆ ที่พยากรณ์เช่นน้ำฟ้า การปกคลุมของเมฆ อุณหภูมิใกล้ผิวพื้น ซึ่งเป็นผลที่ได้จาก Parameterization

อาจกล่าวโดยสรุปการดำเนินงานเพื่อการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข มีขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้ (WMO 1982)

1. การรวบรวมข้อมูล
2. การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น เช่นการถอดรหัสข้อมูล และการตรวจสอบความผิดพลาด
3. การวิเคราะห์เชิงวัตถุประสงค์ (Objective Analysis) เพื่อจัดเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขโดยคอมพิวเตอร์
4. การเตรียมข้อมูลเริ่มต้น (Initialization) สำหรับแบบจำลอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้า (Input)

5. การคำนวณตามระบบสมการของแบบจำลอง เพื่อพยากรณ์องค์ประกอบทางอุตุนิยมวิทยาต่างๆ
6. การหาค่าองค์ประกอบทางอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ ที่ไม่ใช่ผลลัพธ์โดยตรงจากแบบจำลอง

(Derivation of Specific Weather Parameters)

7. การแสดงผลการพยากรณ์ในรูปของแผนที่ แผนที่ภูมิและตัวเลข

ประเด็นคำถามที่น่าสนใจอย่างหนึ่งก็คือ หากแบบจำลองในการพยากรณ์อากาศมีความถูกต้องมาก ความจำเป็นในการพยากรณ์อากาศโดยนักพยากรณ์อากาศจะหมดไปจริงหรือ? คำตอบคือ ไม่ใช่ แบบจำลองที่ได้จากการประมวลผลคอมพิวเตอร์ช่วยทำให้นักพยากรณ์อากาศพยากรณ์อากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยแก่นแท้แล้วแบบจำลองมิได้ให้ความมั่นใจอย่างสมบูรณ์แบบ สิ่งสำคัญที่พึงระลึกเสมอว่าแบบจำลองการพยากรณ์อากาศไม่สมบูรณ์เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. เรายังไม่มีความเข้าใจในกระบวนการต่างๆ ในบรรยากาศได้ทั้งหมด
2. นักวิทยาศาสตร์ไม่สามารถอธิบายกระบวนการต่างๆ ในบรรยากาศด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ทั้งหมด
3. สมการทางคณิตศาสตร์ที่บรรยายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของบรรยากาศไม่ได้ให้คำตอบที่แท้จริง แต่เป็นเพียงการประมาณค่าเชิงตัวเลขเท่านั้น
4. สถานีตรวจอากาศกระจายตามภูมิภาคต่างๆ นั้น ในบางพื้นที่ไม่มีสถานีตรวจอากาศ
5. ข้อมูลที่ได้จากบริเวณที่ปราศจากสถานีตรวจอากาศเป็นผลจากการ Interpolate จากจุดพิกัดกริดที่อยู่โดยรอบหรือประมาณค่าจากแบบจำลองที่ประมวลผลครั้งก่อน ดังนั้นค่าเริ่มแรกที่นำมาประมวลผลจึงอาจเป็นค่าที่ไม่แท้จริงของตัวแปรต่างๆ ในบรรยากาศ
6. ความละเอียดของแบบจำลองภูมิภาค (Regional Model) ดีกว่า Global Model ข้อมูลในพื้นที่ของแบบจำลองภูมิภาคได้มาจากการ Interpolate จากแบบจำลองที่มีจุดพิกัดกริดที่หยาบกว่าจึงอาจมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลขึ้น

7. ประเภทของแบบจำลอง (Type of Models)

ในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขคำว่าแบบจำลอง (Model) มีความหมายที่แตกต่างกันอยู่ 2 ประการ กล่าวคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ได้แก่เซตของสมการที่นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหา ส่วนอีกคำหนึ่งคือ Numerical Model หมายถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้สมการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขจึงเป็นผลรวมระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ และ Numerical Model อันเป็นผลจากการแก้ปัญหา โดยทั่วไปมีอยู่ 2 รูปแบบคือ Grid Point (หรือ Finite Difference) Model และ Spectral Models

7.1 Grid Point Model

ค่าตัวแปรต่างๆ ของบรรยากาศที่วางเรียงลำดับตามพิกัดจุดกริด (ที่มีระยะห่างที่เท่ากัน) ในแต่ละคาบเวลา

Grid Point Model เริ่มจากการวิเคราะห์ตัวแปรของบรรยากาศซึ่งคำนวณจากข้อมูลสถานะเริ่มแรกและอาจรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์ที่ผ่านมานำมาพิจารณาพร้อมด้วย สิ่งสำคัญของข้อมูลสถานะเริ่มแรกนั้น

ต้องมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และมีการผันแปรของข้อมูลเพียงเล็กน้อยก่อนที่จะนำเข้าสู่การแก้สมการของการเคลื่อนที่ ความซับซ้อนของสมการแบบ Non Linear จะถูกแทนด้วยสมการแบบง่าย ๆ (Simpler Algebraic Equation) โดยพยากรณ์เป็นช่วงเวลา (Time Step) การพยากรณ์ในหัวเวลายาว (24, 36, 72 ชั่วโมง) เป็นที่ต้องการของนักพยากรณ์ เพราะแบบจำลองแก้สมการน้อยครั้งกว่าและสามารถพยากรณ์ในคาบเวลา 24 ชั่วโมงในเวลาอันสั้นกว่า อย่างไรก็ตามจุดประสงค์ของการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขคือต้องสามารถแก้ไขสมการการเคลื่อนที่ (Equations of Motion) และถ้าคาบเวลาในการพยากรณ์สั้นปรากฏการณ์แบบ Non linear ของบรรยากาศ จะถูกแก้ไขให้เป็นแบบ Linear ดังนั้น รูปทรงกลมเหลี่ยมอาจมีรูปทรงคล้ายกับวงกลมมากกว่าจะเป็นเหลี่ยมหรือรูปทรงแปดเหลี่ยมอาจดูคล้ายเส้นโค้ง ทำนองเดียวกันถ้าเราให้หัวเวลายในการพยากรณ์นานเกินไป ค่าการพยากรณ์ก็คลาดเคลื่อนมากขึ้น ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์หัวแปรจึงต้องมีค่าใกล้เคียงกัน หากมีตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งแตกต่างกันมาก และมีระยะห่างกันเพียงเล็กน้อย (พื้นที่ขนาดเล็ก) ผลการแก้สมการของแบบจำลองจาก Non Linear ให้มีอยู่ในรูปของ Linear จึงเป็นไปได้

ความยาวนานของคาบเวลาของแต่ละหัวเวลายในการพยากรณ์กำหนดได้จากรายละเอียดของจุดพิกัดกริด เช่น การประมวลผลของ MM5 ที่จุดพิกัดกริดมีขนาด 36 กิโลเมตร เวลาที่ใช้ (Time Step) ประมวลผลแต่ละหัวเวลายในการพยากรณ์ประมาณ 90 วินาที ด้วยเหตุที่แบบจำลองต้องแก้สมการของการเคลื่อนที่ทั้งหมดและครอบคลุมทุกจุดของจุดพิกัดกริด แต่ถ้า MM5 ประมวลผลจุดพิกัดกริดที่มีขนาด 12 กิโลเมตร เวลาที่ใช้จะประมาณ 30 วินาที และหากขนาดจุดพิกัดกริดเท่ากับ 4 กิโลเมตรเวลาที่ใช้จะประมาณ 10 วินาที

7.2 Spectral Models

ในแบบจำลองประเภท Spectral ค่าต่างๆ ของตัวแปรถูกแสดงด้วยรูปแบบของคลื่น (Sine Wave) ซึ่งแสดงในลักษณะของความถี่และ Amplitude ของ Sine Wave บางครั้งอาจได้ยินคำว่า 126 Wave Model หมายความว่า จำนวนคลื่นทั้งหมดที่แบบจำลองนำไปใช้แทนค่าตัวแปรของบรรยากาศ ที่สำคัญคลื่นแต่ละอันในแบบจำลองจะมีความแตกต่าง โดยมีการจัดเรียงลำดับของคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าหรือมีความยาวคลื่นน้อยกว่าต่อเนื่องกันไป อาจกล่าวได้ว่าคลื่นลำดับที่ 44 ให้รายละเอียดดีกว่าคลื่นลำดับที่ 43 การเพิ่มขึ้นของจำนวนคลื่นในแบบจำลอง Spectral คล้ายกับรายละเอียดของ Grid Scale ที่เพิ่มขึ้นใน Grid Point Model

ข้อดีของ Spectral ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า เพราะการพยากรณ์ใช้ฟังก์ชันของ Sine และ Cosine แทนที่จะแก้สมการทุกๆ จุดพิกัดกริด อย่างไรก็ตามเป็นสิ่งที่ยากในการนำมาประยุกต์ใช้โดยเฉพาะบริเวณขอบของพื้นที่ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ Global Model ส่วนมากมักอยู่ในรูปแบบของ Spectral Model แต่ Regional Model มักใช้รูปแบบของ Grid Point Model

8. Computer Model Grid (ตารางกริดในคอมพิวเตอร์)

จุดพิกัดกริด คือ กลุ่มของจุดที่มีระยะห่าง/พื้นที่เท่ากัน แสดงให้เห็นเป็นจุดตัดกันของแนวเส้นอย่างชัดเจน จุดพิกัดกริดมีได้ทั้งแนวตั้ง และแนวนอนแสดงเป็น 3 มิติในบรรยากาศได้ ระยะทางระหว่างจุดพิกัดกริดยังหมายถึงขนาดของกริดด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการมองเห็นสภาพอากาศที่จะเกิดขึ้นด้วย ระยะห่างของจุดพิกัดกริดมีผลต่อรายละเอียดของแบบจำลอง หากรายละเอียดค่อนข้างหยابความถูกต้องของการพยากรณ์อากาศมักประสบปัญหา เพราะปรากฏการณ์ที่มีขนาดเล็กกว่าแต่มีความสำคัญอาจไม่ปรากฏหรืออาจไม่ถูกนำมาประมวลผลในแบบจำลองในส่วนที่เป็นโครงสร้างในทางตั้ง คอมพิวเตอร์จะคำนวณโดยแบ่งผล

จากการเคลื่อนที่ในทางตั้งของบรรยากาศ ดังนั้นหากมีรายละเอียดสูงความถูกต้องในการพยากรณ์ก็จะมีมากขึ้นเช่นกัน

8.1 Grid Resolution

คือ รายละเอียดของแบบจำลองบรรยากาศอธิบายในลักษณะของมิติที่เล็กที่สุดที่ถูกนำมาแก้สมการด้วยทั้งในแง่พื้นที่ในแนวระนาบและแนวตั้งตลอดจนเวลา

8.1.1 แนวระนาบ (Horizontal)

กริด คือ กลุ่มของจุดที่แสดงให้เห็นเป็นจุดตัดทั้งในแนวขนานและตั้งฉากซึ่งกันและกัน โครงสร้างของกริดอาจครอบคลุมอยู่ในหนึ่งปริมาตรของบรรยากาศ ขนาดของกริดแตกต่างกันออกไป เช่น 200, 100, 50, 25 กิโลเมตร เป็นต้น ส่วนตารางกริดที่มีความหยาบมากอาจใช้เป็น Boundary Condition สำหรับแบบจำลองที่มีตารางกริดที่ละเอียดกว่า ตารางกริดที่มีขนาดเล็กลงรายละเอียดของตัวแปรบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นสภาพอากาศที่มีขนาดเล็กอาจมองเห็นได้ชัดเจน

8.1.2 แนวตั้ง (Vertical)

จำนวนชั้นของแบบจำลองคือรายละเอียดในทางตั้งของแบบจำลอง ทั้งนี้ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา (อุณหภูมิ, ความกดอากาศ, ความชื้น, และลม ฯลฯ) แสดงให้เห็นในรูปของความชัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในแนวตั้งมากกว่าที่จะพบในแนวนอน จึงจำเป็นต้องแบ่งชั้นของบรรยากาศในทางตั้งออกเป็นหลายชั้น

- Constant Altitude ถึงแม้ว่าจะแบ่งโครงสร้างในทางตั้งออกเป็นช่วงๆ ช่วงละเท่าๆ กันโดยพิจารณาจากระดับ MSL หรือเหนือพื้นดิน แต่เป็นการยากที่จะนำมาใช้กับแบบจำลอง ทั้งนี้เพราะความสูงของลักษณะภูมิประเทศที่ทำให้ความสูงของเส้นเหล่านี้ไม่ต่อเนื่อง

- Terrain Following การแบ่งชั้นในแนวตั้งตามรูปแบบของภูมิประเทศที่อยู่เบื้องล่างโดยแบบจำลอง ตัวอย่างการแบ่งชั้นบรรยากาศในแนวตั้งเช่น Sigma และ eta

- Isentropic ถ้าผลของ Diabatic (เช่น ความร้อนของบรรยากาศเนื่องจากการคายความร้อนแฝง, แรงแผ่นดิน หรือสาเหตุอื่นๆ) มีค่อนข้างน้อย ลมจะพัดไปตามระนาบของ Isentropic (Potential Temperature, Theta ตามกฎอนุรักษ์) ข้อเท็จจริงนับว่าเป็นข้อดีทั้งด้านฟิสิกส์และเชิงคณิตศาสตร์ที่จะนำเอาระนาบของ Isentropic เป็นพิกัดในทางตั้ง

8.2 Temporal

สภาพอากาศเกิดขึ้นบนสเกลเวลา (Time Scales) ที่มีขนาดเล็กกว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขจะไม่ถูกนำเข้ามามีผลด้วย ตัวอย่างเช่นแบบจำลองประมวลผลทุก 1 ชั่วโมง แบบจำลองนี้จะไม่สามารถพยากรณ์พายุฟ้าคะนองที่มีระยะเวลาในการก่อตัวจนถึงขั้นสลายตัวน้อยกว่า 1 ชั่วโมง รายละเอียดของเวลามากไม่ก่อให้เกิดปัญหามากนักในแบบจำลอง ทั้งนี้เนื่องจาก Time Step โดยทั่วไปมีระยะเวลาสั้นมากพอที่จะวิเคราะห์สภาพอากาศที่สำคัญได้

9. Statistic Models

เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะสร้างการพยากรณ์อากาศที่สมบูรณ์ บ่อยครั้งที่เราจำเป็นต้องอ้างถึงค่าสถิติ เพื่อที่จะลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล Statistical Model แบ่งได้ 3 ประเภทคือ

9.1 Classical Statistic Model แสดงในลักษณะเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างข้อมูลการตรวจอากาศ และค่าตัวแปรที่ได้จากการพยากรณ์ Classical Statistic Model ใช้ได้ดีในกรณีของการพยากรณ์อากาศระยะสั้นสำหรับท้องถิ่น ตัวอย่างเช่น โอกาสเกิดพายุฟ้าคะนอง ในช่วงบ่าย พิจารณาจากค่า CAPE (Convective Available Potential Energy) ที่ได้จากการตรวจอากาศ ชั้นบนในเวลาเช้า หรือ อุณหภูมิสูงสุดพิจารณาจากอุณหภูมิที่ระดับ 850 hPa ของผลการตรวจอากาศชั้นบนในเวลาเช้า

9.2 Perfect Prog Statistic สมมุติฐานเริ่มแรกต้องเชื่อว่าแบบจำลองพยากรณ์อากาศได้ ถูกต้องแล้ว นำค่าสถิติภูมิอากาศมาพิจารณาความเป็นไปได้ของการเกิดปรากฏการณ์ เช่น 70% ของโอกาสเกิดฝนหมายความว่า Prog ที่ได้จากแบบจำลองในอดีตแสดงการตกของฝน 7 ใน 10 ครั้ง

9.3 Imperfect Prog ความน่าจะเป็นของการเกิดปรากฏการณ์ในอนาคตขึ้นอยู่กับความลำเอียง (Bias) ของแบบจำลองที่เคยมีมาในอดีตหรืออาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองพยากรณ์สภาพอากาศบริเวณใดบริเวณหนึ่งผิดอยู่เป็นประจำ ดังนั้นการปรับแก้ควรคาดหมายให้เป็นสิ่งตรงข้ามกับผลที่ได้จาก Prog

9.4 Model Output Statistic (MOS) ผลรวมของ Imperfect Prog และเราสามารถหาค่าสถิติในการปรับแก้ตัวอย่างถ้าแบบจำลอง XYZ พยากรณ์จำนวนการแผ่รังสีออกในเวลากลางคืนของสถานี G ในขณะที่สถานี G ตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของศูนย์กลางของความกดอากาศสูงในฤดูหนาว ผลลัพธ์ของ XYZ MOS Output จะแสดงค่าอุณหภูมิต่ำสุด XYZ Model ทั้งนี้เนื่องจาก MOS Forecast ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้นในช่วงเวลาที่ผ่านมาก ดังนั้นผลของ MOS Output จึงพยากรณ์ค่าตัวแปรได้ดีกว่า XYZ Model เพียงอย่างเดียว

10. Initialization and Verification

การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขเป็นการพยากรณ์อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งมีการปรับให้มีความถูกต้องอยู่ตลอดเวลา แต่อย่างไรก็ตามยังต้องการนักพยากรณ์อากาศทำหน้าที่ในการตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองว่าเป็นไปอย่างถูกต้องหรือใกล้เคียงสภาพอากาศที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบันเพียงใด กระบวนการตรวจสอบดังกล่าว เรียกว่า Initialization และ Verification

ผลการพยากรณ์เวลา 00-hour Forecast หรือ Initial Panel of Model ซึ่งแต่เดิมมีการใช้อย่างผิดๆ โดยเชื่อว่า ผลลัพธ์ของผลการพยากรณ์เวลานี้คือการวิเคราะห์ (Analysis) แต่ในความเป็นจริงแล้วแบบจำลองพิจารณาเป็นจุดเริ่มต้น (First Guess) ก่อนที่จะพยากรณ์หรือพยายามที่แก้ไขข้อมูลเหล่านี้ด้วยข้อมูลปัจจุบัน (Real Time Data) ถ้าผลการคำนวณของแบบจำลองที่ผ่านมามีความคลาดเคลื่อน ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลในปัจจุบันก็จะคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ดังนั้นนักพยากรณ์จำต้องแก้ไขข้อผิดพลาดทั้งปวงที่เกิดขึ้นในเวลา 00 hour Forecast หากไม่มีการปรับแก้การใช้แบบจำลองอาจขาดความมั่นใจ

ขั้นตอนในการทำ Initialization และ Verification (IV Process) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. โดยทั่วไป Verification กระทำกับผลลัพธ์ของแบบจำลอง 12 หรือ 24 ชั่วโมงที่ผ่านมา โดยเปรียบเทียบ Prog นั้นกับสถานะปัจจุบัน (00 hr) วิธีปฏิบัติตรวจสอบข้อมูลที่ผ่านมากับ 00 hr (วัน/เวลา ของ Prog ต้องตรงกับ 00 hr) โดยใช้สีอื่นๆ เช่น สีเหลือง/ส้ม เมื่อตรวจสอบเสร็จนักพยากรณ์อากาศสามารถเปรียบเทียบตำแหน่งต่างๆ ที่พยากรณ์ในเวลา 00 hr ณ จุดนี้นักพยากรณ์อากาศพยายามที่จะทราบว่าแบบจำลองที่ผ่านมาพยากรณ์ได้ดีเพียงใด

2. Initialization เป็นการพิจารณาเฉพาะ 00 hr เท่านั้น โดยเปรียบเทียบตำแหน่งต่างๆ ของ เวลา 00 hr กับ การวิเคราะห์ (Analysis) โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาหรือข้อมูลอื่นๆ ที่เป็นปัจจุบัน (Real Time Data) ในเวลาเดียวกัน เพื่อพิจารณาว่า 00 hr พยากรณ์ได้ดีเพียงไร ตัวอย่างเช่น พิจารณาแผนที่ Vorticity ที่ระดับ 500 hPa ของ Initialize (00 hr) โดยเปรียบเทียบ Major Short Wave Trough ในภาพถ่ายดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา และผลการวิเคราะห์ 500 hPa หากลักษณะสำคัญในแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูล ณ ปัจจุบันก็ไม่ต้องปรับแก้แต่อย่างใด และสามารถแสดงผลพยากรณ์ในส่วนที่เหลือได้อย่างมั่นใจ หากลักษณะสำคัญไม่สอดคล้องกับ 00 hr จำเป็นต้องปรับแก้และการใช้ผล Prog อาจมีข้อกังขา

3. การตรวจสอบคุณภาพ (Quality Control of Verification) เพื่อตรวจสอบผลการพยากรณ์อากาศของแบบจำลองที่พยากรณ์ต่อจาก 00 hr ไปอีก 2 ช่วง (Step) โดยทำการเปรียบเทียบตำแหน่งสำคัญๆ จากผลการพยากรณ์ในคาบ 12 ชั่วโมงข้างหน้า (12 hr Forecast) ที่พยากรณ์ต่อจาก 00 hr (Current Run) กับข้อมูลปัจจุบัน (Real Time Data) เพื่อพิจารณาว่าแบบจำลองยังคงพยากรณ์ได้ดีอย่างต่อเนื่องหรือว่าพยากรณ์ด้วยลงไป ใน 2 ช่วงแรกของการพยากรณ์ ตัวอย่างเช่น

ถ้า 00 hr (Forecast) เป็นของวันที่ 15/00 Z ดังนั้น 12 hr Forecast ตรงกับวันที่ 15/12 Z ณ วันที่ 15/12 Z นักพยากรณ์อากาศตรวจสอบลักษณะสำคัญกับข้อมูลปัจจุบัน (Real Time) เพื่อพิจารณาว่าผลลัพธ์ของแบบจำลองเป็นอย่างไร (พยากรณ์ช้าเกินไป, เร็วเกินไป) ทำให้เราทราบแนวโน้มของการวิเคราะห์ได้

ลักษณะสำคัญที่ใช้ในการ Initialization/Verification มีดังต่อไปนี้

- 1) Long Wave Amplitude และ Orientation
- 2) Short Wave
- 3) Jet Core
- 4) Surface Front
- 5) บริเวณพื้นที่ปกคลุมด้วยเมฆกับบริเวณ PVA
- 6) อื่นๆ ที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วแต่พิจารณาว่าเป็นสิ่งสำคัญ

11. แบบจำลองที่ใช้ในการปฏิบัติการและประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Operational Models and Their Performance)

Feet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) Model

Navy Operational Global Analysis and Prediction System (NOGAPS) คือ แบบจำลองหนึ่งที่จะกระจายข้อมูลที่สำคัญให้เป็นข้อมูลนำเข้าให้กับแบบจำลองอื่นๆ เช่น Navy's Advanced Coupled Ocean Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS) และ FNMOC ฯลฯ

แบบจำลอง NOGAPS พยากรณ์อากาศ 6 วันล่วงหน้า ณ ระดับความสูงตั้งแต่ผิวพื้น - 10 hPa โดยประมวลผล 2 ครั้งต่อวัน คือ เวลา 00 Z และ 12 Z ทักษะโดยทั่วไปของแบบจำลองมีค่อนข้างสูงในมหาสมุทร Atlantic แต่ค่อนข้างน้อยในเขต Tropic

คุณลักษณะของ FNMOC NOGAPS

| | | |
|----------------------------|---|--------------|
| Model Type | : | Spectral |
| Vertical Coordinate System | : | Sigma |
| Horizontal Resolution | : | 83 km |
| Vertical Resolution | : | 24-36 Layers |
| Domain | : | Global |

ข้อดีและข้อด้อยของ NOGAPS

1. การเพิ่มขึ้นของความรุนแรงของหย่อมความกดอากาศต่ำที่ผิวพื้น (Surface Low) และการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มแรกของการก่อตัวพายุ และพยากรณ์ความรุนแรงลดลงต่ำกว่าความเป็นจริง
2. หย่อมความกดอากาศต่ำที่ผิวพื้นที่เกิดขึ้นทางตอนเหนือของ Polar Front Jet พยากรณ์ให้มีความรุนแรงเกินความเป็นจริง รวมทั้งการพยากรณ์การอ่อนกำลังลงก็ต่ำกว่าที่เกิดจริง ในขณะที่หย่อมความกดอากาศต่ำที่ผิวพื้นทางตอนใต้ของ Polar Front Jet มักพยากรณ์ความรุนแรงอ่อนกว่าสภาพความเป็นจริง
3. NOGAPS มีแนวโน้มที่จะรวม Low ให้เป็นหนึ่งเดียว โดยเฉพาะนำไปรวมกับ Low มีความกดอากาศต่ำกว่าเมื่อเวลาผ่านไป
4. Low ที่ผิวพื้นที่เกิดขึ้นและเกี่ยวข้องกับ Cut off Low ในระดับบนในช่วงฤดูหนาว พยากรณ์ให้มีกำลังแรงเกินไปเล็กน้อย Cut off Low ในชั้นเจริณเติบโตเต็มที่อ่อนกำลังต่ำกว่า ในน่านน้ำ Cut off Low ก็เช่นกันมักพยากรณ์ให้มีความรุนแรงมากเกินความจริงเมื่อเวลาผ่านไป
5. การพยากรณ์ความชื้นเหนือพื้นดินมากเกินไป
6. Cyclone กำลังแรง (ความกดอากาศลดลง 15 hPa ในช่วงเวลามากกว่า 24 ชั่วโมง) พยากรณ์ความรุนแรงได้ต่ำกว่าและความกดอากาศบริเวณศูนย์กลางต่ำกว่าการวิเคราะห์ข้อมูลจริง
7. NOGAPS มีแนวโน้มที่จะพยากรณ์การเกิดและความรุนแรงของ Tropical Cyclone มากเกินไป ในขั้นการก่อตัวของ Tropical Cyclone พยากรณ์การเคลื่อนตัวต่ำกว่า และภายหลังที่ Tropical Cyclone มีความรุนแรงสูงสุด (Mature Tropical cyclone) ก็ยังพยากรณ์การเคลื่อนตัวได้ต่ำกว่าทั้งในระหว่างหรือหลังจากเคลื่อนตัวออกจากเขตร้อนเป็น Extra tropical Cyclone
8. พยากรณ์การก่อตัวของ Cut off Low ในระดับบนได้ดีในช่วงเปลี่ยนฤดู ส่วนหย่อมความกดอากาศต่ำที่ผิวพื้นอันเกิดจากการเหนี่ยวนำของ Low ในระดับบนมักพยากรณ์ความรุนแรงมากกว่าความจริงเล็กน้อย

* * * * *