การควบคุมความคับคั่งของข้อมูลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย
Congestion Control in Wireless Sensor Networks: A Survey

เพชร อิ่มทองคำ (Phet Aimtongkham)[1] และจักรชัย โสอินทร์ (Chakchai So-In)[1]
[1]ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
phet@kkumail.com, chakso@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาเทคนิคการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิควิธีการที่ใช้ในการจัดการและความคุมความคับคั่งโดยแบ่งประเภทตามวิธีการจัดการความคับคั่งซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ 1) การควบคุมความคับคั่งโดยควบคุมทรัพยากร 2) การควบคุมความคับคั่งโดยควบคุมการส่งข้อมูล 3) การควบคุมความคับคั่งโดยใช้การจัดการคิวและการลำดับความสำคัญ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบเพื่อหาข้อดีและข้อจำกัดในเทคนิควิธีการแต่ละประเภท เพื่อเป็นแนวคิดในการปรับปรุงเทคนิควิธีการจัดการความคับคั่งในอนาคต

คำสำคัญ: การจัดการความคับคั่ง เครือข่ายเซ็นเซอไร้สาย อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This paper purpose a survey of Congestion Control in Wireless Sensor Networks. The objective of this survey to cataloging a congestion control technique in 3 types contain 1) Resource Control 2) Traffic Control and 3) Query assist and priority aware by comparison study of advantage/limitation of each related work for prepare an ideal to contribute a congestion control technique in future.

Keyword: Congestion Control, Wireless Sensor Networks, Internet of Things

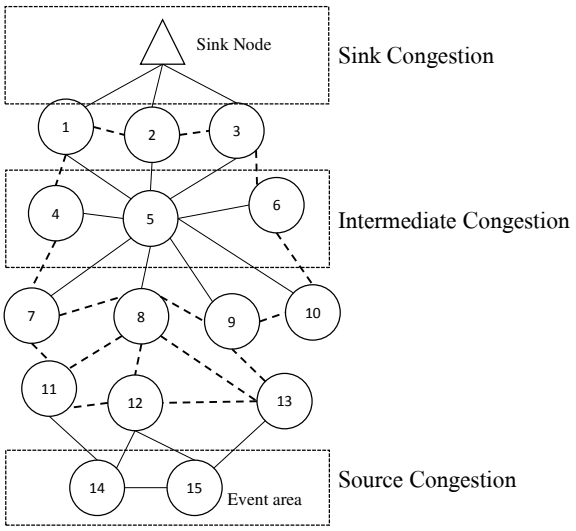
1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตนั้นได้ถูกผนวกเข้าเป็นส่วนหนึ่งในกิจวัตรประจำวันของมนุษย์ซึ่งจากผลการศึกษาของการ์ดเนอร์ (Gardner) พบว่าในปี 2017 มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายอินเตอร์เน็ตมากถึง 8.4 พันล้านชิ้น และมีการคาดการว่าจะเพิ่มขึ้นถึง 20.4 พันล้านชิ้นในปี 2020 [1] ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าปัจจุบันเป็นยุคของการเปลี่ยนผ่านไปสู่ยุคอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing - IoT) และจากข้อมูลของบริษัทอินเทล (Intel) พบว่ากว่า 90.6% ของอุปกรณ์ IoT เหล่านั้นเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดและรายงานสถานะโดยส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่ายอินเตอร์เน็ตหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network - WSN) [2] นอกจากนั้นแล้วสถาบันวิจัยเอบีไอ (Abiresearch) คาดการว่าในปี 2020 จะมีอุปกรณ์ WSN ที่กระจายอยู่ทั่วโลกมากถึง 183 พันล้านเซ็นเซอร์ [3] และเนื่องจากอุปกรณ์ WSN มีขนาดเล็กมากจึงนิยมใช้สรรพนามแทนอุปกรณ์เหล่านี้ว่าโหนด Node) ซึ่งเซ็นเซอร์โหนดนี้จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลระหว่างกันด้วยเครือข่ายไร้สายผ่านคลื่นวิทยุโดยจะสื่อสารกันในลักษณะเครือข่ายที่ไม่มีโครงสร้างคงที่ (ad hoc) [4] ประกอบด้วยโหนดต้นทาง (Source node) ทำหน้าที่ในการตรวจวัดข้อมูลและส่งข้อมูลไปยังโหนดระหว่างทาง (Intermediate node) ซึ่งโหนดเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการส่งต่อข้อมูลระหว่างกันเพื่อนำส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานหรือโหนดปลายทาง (Sink node) แต่เนื่องจากโหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กมีข้อจำกัดทั้งในเรื่องของระยะทางในการส่งสัญญาณ, ประสิทธิภาพของหน่วยประมวลผล, ปริมาณหน่วยความจำและการใช้พลังงาน [5] ทำ

ให้ต้องมีการส่งต่อข้อมูลระหว่างกันหลายทอดเพื่อเพิ่มระยะทางและการส่งต่อข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายระหว่างกัน ในปริมาณมากนี้นำมาสู่ปัญหาการความคับคั่งของข้อมูล [6 - 7]

ความคับคั่งของข้อมูล (Congestion) คือสภาวะการที่เกิดขึ้นเมื่อโหนดที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลข้อมูล (Upstream - US) ทำการส่งข้อมูลในปริมาณที่มากเกินกว่าขีดความสามารถในการรับข้อมูลของโหนดที่ทำหน้าที่รับข้อมูล (Downstream - DS) จะสามารถรับได้ [8] ซึ่งกรณีเช่นนี้จะเกิดจากการที่มีจำนวนโหนด US มากกว่าโหนด DS โดยจากการศึกษาลักษณะการเกิดความคับคั่งของข้อมูลนั้นสามารถแบ่งออกโดยสรุปได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ [9-10]

- ความคับคั่งที่โหนดต้นทาง (Source congestion): เป็นลักษณะการเกิดความคับคั่งข้อมูลเมื่อมีโหนดต้นทางที่อยู่บริเวณใกล้กันมีความต้องการในการส่งข้อมูลพร้อม ๆ กันซึ่งลักษณะการเกิดความคับคั่งประเภทนี้มักจะเกิดจากบริเวณที่มีการเกิดเหตุการณ์ในวงกว้างที่ทำให้ทุก ๆ โหนดในบริเวณใกล้เคียงทำการรายงานสถานะการณ์และมีการส่งข้อมูลในปริมาณมากพร้อม ๆ กันเช่นการเกิดภัยพิบัติที่มีความรุนแรงหรือการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูล(Packet loss) ไปในบริเวณที่เกิดเหตุการณ์อันเป็นผลมาจากโหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลไม่สามารถรับข้อมูลได้ทัน
- ความคับคั่งที่โหนดระหว่างทาง (Intermediate congestion): เป็นลักษณะการเกิดความคับคั่งของข้อมูลในบริเวณที่มีการส่งต่อข้อมูลหลายทอดซึ่งในจุดนี้จะมีโหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล (Intermediate node) ทำหน้าที่รับและส่งต่อข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางแต่เมื่อโหนดที่ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลได้รับข้อมูลในปริมาณมากกว่าขีดจำกัดที่จะรับได้ซึ่งอาจเกิดจากการรับข้อมูลจากหลายแหล่งพร้อมกันหรือการรับข้อมูลในปริมาณมากกว่าขีดความสามารถของหน่วยความจำสำรอง (Buffer) ในกรณีที่เกิดความคับคั่งในลักษณะนี้จะทำให้ข้อมูลบางส่วนอาจสูญหายทำให้ต้องมีการร้องขอให้ส่งข้อมูลซ้ำใหม่ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มมากขึ้นทั้งในส่วนที่เป็น US และ DS [11] ความคับคั่งที่โหนดปลายทาง (Sink congestion): เป็นลักษณะการเกิดความคับคั่งของข้อมูลในจุดที่เป็นสถานีฐานหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโหนดปลายทาง (Sink node) โดยเกิดจากความต้องการส่งข้อมูลของโหนดต้นทางหรือโหนดระหว่างทางที่ต้องการส่งข้อมูลเข้ามายังสถานีฐานในปริมาณที่มากกว่าขีดความสามารถของสถานีฐานจะให้บริการได้ซึ่งเมื่อเกิดเหตุการณ์ความคับคั่งประเภทนี้สถานีฐานจะรับข้อมูลที่ส่งมาถึงสถานีฐานก่อนเสมอส่วนข้อมูลที่ส่งถึงในภายหลังจะต้องรอคิวในการส่งข้อมูลตามลำดับจะส่งผลให้โหนดที่รอส่งข้อมูลเกิดการสิ้นเปลืองหน่วยความจำ Buffer memory จากการที่ต้องรับภาระคิวการส่งข้อมูลทำให้ไม่มีพื้นที่พอที่จะรับข้อมูลที่เข้ามาใหม่ส่งผลให้เกิด packet loss [12]



ภาพที่ 1: ตัวอย่างความคับคั่งของเครือข่าย WSNs

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การควบคุมความคับคั่งของข้อมูลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ในกระบวนการจัดการความคับคั่งของข้อมูลนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสามระยะสำคัญได้แก่ระยะแรกคือส่วนของการตรวจจับความคับคั่งข้อมูลระยะที่สองการแจ้งเตือนสถานะความคับคั่งและส่วนสุดท้ายคือการจัดการควบคุมความคับคั่งตามลำดับ

2.1.1 การตรวจจับความคับคั่งของข้อมูล (Congestion detection)

A) การตรวจจับจากสถานะการถือครองหน่วยความจำ (Buffer occupancy)

ในการส่งต่อข้อมูลกันบนเครือข่าย WSN นั้นเซ็นเซอร์โหนดจะอาศัยหน่วยความจำขนาดเล็กที่ชื่อว่าบัฟเฟอร์ (buffer) ทำหน้าที่ในการรับข้อมูลเพื่อรอการส่งต่อซึ่งการเกิดสภาวะความคับคั่งของข้อมูลจะเกิดขึ้นเมื่อมีข้อมูลปริมาณมากถูกส่งเข้ามาที่โหนดทำให้หน่วยความจำบัฟเฟอร์เต็มจนอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานได้

B) ค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel load)

ค่าความจุช่องสัญญาณถูกใช้เป็นตัวชี้วัดสถานะความคับคั่งของข้อมูลเนื่องจากในเครือข่ายแบบไร้สายนั้นแถบความกว้างของช่องสัญญาณถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อขีดความสามารถในการส่งข้อมูลเมื่อเซ็นเซอร์โหนดมีการส่งข้อมูลพร้อมกันจะเกิดการแบ่งช่องสัญญาณเมื่อช่องสัญญาณแคบลงทำให้ส่งข้อมูลได้น้อยและเกิดเป็นสถานะความคับคั่งในการส่งข้อมูลจึงใช้ตัวแปรนี้ในการบ่งชี้การเกิดความคับคั่ง

C) ระยะเวลาในการส่งข้อมูล (Packet service time)

ระยะเวลาในการส่งข้อมูลซึ่งเกิดจากการคำนวณจากค่าเวลาที่แตกต่างกันระหว่างแพ็กเกตแรกที่เดินทางจากโหนดหนึ่งมายังอีกโหนดหนึ่งและระยะเวลาในการส่งข้อมูลทั้งหมดหรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่าค่าความหน่วงในการส่งข้อมูลระหว่างจุดต่อจุด (One-hop node delay)

2.1.2 การแจ้งเตือนการเกิดความคับคั่ง (Congestion notification)

A) การแจ้งเตือนความคับคั่งของข้องมูลโดยตรง (Explicit congestion notification)

เป็นเทคนิคการแจ้งเตือนการเกิดสถานะความคับคั่งของข้อมูลโดยที่โหนดที่เกิดความคับคั่งจะแจ้งเตือนสถานะของตัวเองโดยการเพิ่มข้อมูลสถานะเข้าไปในคอนโทรลแพ็กเกตเพื่อให้โหนดที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลได้รับทราบว่าเกิดสถานะความคับคั่งซึ่งวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในเครือข่าย WSN เนื่องจากเป็นการซ้ำเติมเพิ่มระดับการเกิดความคับคั่งจากการเพิ่มคอนโทรลแพ็กเกต

B) การแจ้งเตือนสถานะโดยนัย (Implicit congestion notification)

เป็นเทคนิคที่ไม่มีการเพิ่มข้อมูลเข้าไปในคอนโทรแพ็กเกตแต่ใช้การแฝงการแจ้งเตือนสถานะการเกิดความคับคั่งผ่านส่วนหัวของแพ็กเกต (Packet header) และใช้กระบวนการตอบรับข้อมูล (ACK) เป็นตัวบอกสถานะโดยนัยว่าโหนดที่อยู่ภายภาคหน้าเกิดปัญหาความคับคั่งของข้อมูล

2.1.3 การควบคุมความคับคั่ง (Congestion control)

A) การควบคุมความคับคั่งโดยควบคุมทรัพยากร (Resource Control - RC)

ในการจัดการความคับคั่งของข้อมูลด้วยวิธีการปรับอัตราการส่งข้อมูล (Traffic Control) นั้นมีข้อจำกัดที่เห็นได้ชัดเลยว่าข้อมูลที่มีความสำคัญบางส่วนอาจสูญหายหรือส่งถึงสถานีฐานไม่ทันเวลาจนอาจเกิดผลกระทบต่อการให้บริการ [9] จึงเป็นเหตุให้เกิดแนวคิดการจัดการความคับคั่งข้อมูลโดยการควบคุมทรัพยากรซึ่งเทคนิคที่นำมาใช้มีอยู่หลายวิธีอาธิเช่น การเพิ่มทรัพยากรเครือข่ายโดยการใช้ประโยชน์จากโหนดหรือเส้นทางที่ไม่เกิดความคับคั่งในการส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานโดยการสร้างเส้นทางใหม่ซึ่งวิธีนี้จะช่วยเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้สูงขึ้นได้โดยที่ขั้นตอนวิธีแบบ RC นี้มีความเหมาะสมกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ที่มีลักษณะการรายงานสถาณการณ์แบบตามเหตุการณ์ (Event based)

B) การควบคุมความคับคั่งโดยควบคุมการส่งข้อมูล (Traffic Control - TC)

เป็นเทคนิคการจัดการความคับคั่งของข้อมูลโดยเน้นที่การควบคุมอัตราการส่งข้อมูลด้วยวิธีการปรับอัตราการส่งข้อมูลให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีการปรับเพิ่มลดแบบ (Additive Increase Multiplicative Decrease – AIMD) [14] หรือขั้นตอนวิธีอื่นในลักษณะที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นพื้นฐานมาจากการควบคุมความคับคั่งในเครือข่ายคอมพิวเตอร์ [15] โดยที่ AIMD จะตรวจสถานะการใช้การแบนวิธในขณะส่งข้อมูลและทำการปรับเพิ่มลดอัตราการส่งโดยคำนึงถึงความยุติธรรมต่อโหนดทุก ๆ โหนดให้มีโอกาสได้ใช้แบนวิธในการส่งข้อมูลเท่ากันซึ่งการจัดการความคับคั่งข้อมูลแบบ TC นี้มีความเรียบง่ายและไม่ซับซ้อนโดยหน้าที่การปรับลดการส่งข้อมูลจะเป็นหน้าที่ของโหนดต้นทาง(Source node) แต่ข้อจำกัดของเทคนิค TC คือในกรณีที่เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นมีการรายงานสถานการณ์แบบตามเหตุการณ์ (Event based) การปรับลดอัตรา

การส่งข้อมูลในขณะเกิดเหตุการณ์อาจส่งผลกระทบต่อการรายงานข้อมูลได้ ดังนั้นเทคนิค TC มีความเหมาะสมกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ที่รายงานสถานะแบบระยะ (Interval based)

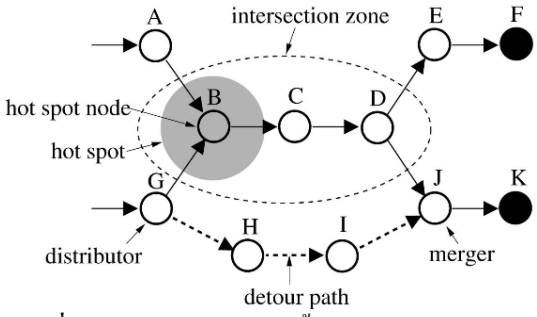
C) การควบคุมความคับคั่งโดยใช้การจัดการคิวและการลำดับความสำคัญ (Queue-assisted and Priority-aware congestion control)

ถึงแม้ว่าการจัดการควบคุมการเกิดความคับคั่งข้อมูลจะสามารถแบ่งออกตามประเภทใหญ่ ๆ ได้2 ประเภทคือ RC และ TC แต่ยังมีงานวิจัยที่ได้นำเสนอเทคนิคการจัดการคิวและการลำดับความสำคัญซึ่งนิยมใช้เป็นเทคนิคเสริมเข้ากับการจัดการแบบ RC และ TC ทั้งนี้ก็เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการความคับคั่งโดยที่ผลพลอยได้จากการจัดการคิวที่ดีจะทำให้โหนดสามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นการลดโอกาสการเกิดสภาวะความคับคั่งของข้อมูลได้ นอกจากนั้นแล้วยังมีการนำเทคนิคการจัดกลุ่มเพื่อลำดับความสำคัญของข้อมูลเพื่อเพิ่มคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service - QoS) ไม่ว่าจะเป็นการแบ่งประเภทของข้อมูล,การแบ่งลำดับความสำคัญตามชนิดของโหนดที่ส่งข้อมูลเป็นต้น

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการความคั่ง

3.1) Topology Aware Resource Adaptation (TARA) [16]

งานวิจัย TARA นำเสนอโดย Jaewon และคณะในปี 2007 โดยมุ่งเน้นไปที่การจัดการปัญหาความคับคั่งของข้อมูลในบริเวณจุดตัด (Intersection) จะอยู่ในส่วนของโหนดระหว่างทางโดยที่ TARA ได้มีการพิจารณาการเกิดความคับคั่งโดยคำนึงถึงสถานะการถือครองหน่วยความจำ (Buffer occupancy) และสถานะความจุช่องสัญญาณ (Channel load) และใช้หลักการการกระจายเส้นทางผ่านการสร้างเส้นทางใหม่ (Distributor path) ในจุดที่เกิดความคับคั่งซึ่งเมื่อข้อมูลเดินทางผ่านส่วนที่เกิดความคับคั่งแล้วจะมีการรวมข้อมูลจากสองเส้นทางที่จุดรวมข้อมูล (Merger nodes) โดยการรวมข้อมูลที่ส่งมาจากเส้นทางเดิม (Original path) และเส้นทางที่สร้างขึ้นใหม่เพื่อหลีกหนีความคับคั่ง (Detour path) เข้าไว้ด้วยกัน

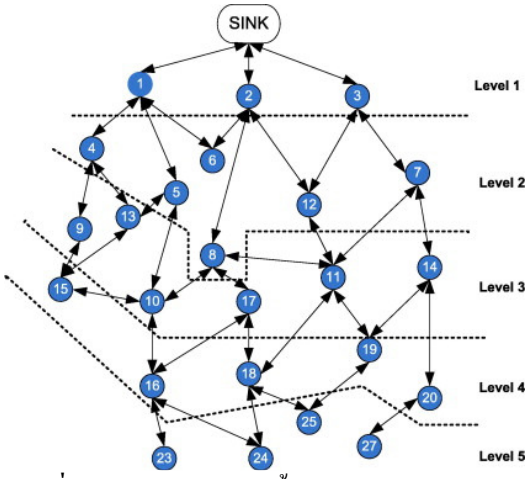


ภาพที่ 2 แสดงการทำงานของขั้นตอนวิธี TARA

จากภาพที่ 2 กำหนดให้โหนด *A* และโหนด *G* เป็นโหนดต้นทางสองโหนดที่ส่งข้อมูลผ่านโหนด *B* ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Intersection) เมื่อโหนด *B* ได้รับข้อมูลจากหลายต้นทางทำให้เกิดสถานะความคับคั่งของข้อมูลขั้นตอนวิธี TARA จะเปลี่ยนสถานะของโหนด *G* ให้เป็นโหนดกระจายภาระงาน (Distributor node) ทำการส่งข้อมูลผ่านเส้นทางเลี่ยงความคับคั่ง (Detour path) ก่อนที่จะไปบรรจบกับข้อมูลที่มาจากเส้นทางเดิมที่โหนด *J* ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นโหนดที่รวมข้อมูลจากสองเส้นทาง (Merger node) และส่งต่อให้กับโหนดถัดไป

3.2) Dynamic Alternative Path Selection protocol (DAlPaS) [18]

ในการจัดการความคับคั่งของข้อมูลด้วยวิธีการควบคุมทรัพยากรมีความโดดเด่นในเรื่องของความสามารถในการปรับเปลี่ยนกฎวิธีการได้หลายวิธีทำให้ต่อมาในปี 2014 Sergiou และคณะได้มีการพัฒนาโปรโตคอลจัดการทรัพยากรเพื่อลดความคับคั่งของข้อมูลโดยได้ต่อยอดจากขั้นตอนวิธี HTAP ซึ่งยังมีข้อจำกัดบางส่วนโดยเฉพาะความหน่วงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างโครงข่ายแบบลำดับขั้น จึงได้นำเสนอโปรโตคอล DAIPaS โดยหลักการทำงานของโปรโตคอลนี้ได้นิยามการเกิดความคับคั่งอย่างง่าย โดยนิยามว่าหากโหนดใดก็ตามที่รับข้อมูลจากโหนดอื่นๆมากกว่าหนึ่งโหนดให้ถือว่าโหนดนั้นเกิดความคับคั่ง



ภาพที่ 3 แสดงการจัดลำดับชั้นของ DAIPaS

DAIPaS ได้แบ่งกระบวนการจัดการความคับคั่งเป็นสองระดับได้แก่ ในส่วนแรก Soft-stage scheme เป็นตัวกำหนดการไหลของข้อมูลให้แต่ละโหนดที่ทำการส่งต่อข้อมูลเลือกรับของมูลจากโหนดอื่นเพียงโหนดเดียวเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลให้สถานะการถือครองหน่วยความจำบัฟเฟอร์ลดลง แต่หากยังเกิดความคับคั่งของข้อมูลจะเข้าสู่กระบวนการในขั้นที่สอง Hard-stage scheme โดยการเปลี่ยนเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังเส้นทางที่ไม่มีความคับคั่ง

3.3) Congestion control and energy-balanced scheme based on the hierarchy for WSNs (CcEbH) [19]

การจัดการความคับคั่งของข้อมูลโดยการสร้างเครือข่ายแบบลำดับชั้นยังคงได้รับความสนใจและถูกพัฒนาเรื่อยมาทำให้ในปี 2017 Chen และคณะได้นำเสนอผลงานวิจัยในการสร้างโครงข่ายแบบลำดับชั้นเพื่อจัดการปัญหาความคับคั่งข้อมูลโดยคำนึงถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งขั้นตอนวิธี CcEbH นี้ใช้หลักการสร้างโครงสร้างเครือข่าย (Topology) ลำดับชั้นคล้ายคลึงกับงานวิจัย DAIPaS [18] แต่มีการนำตัวแปรด้านระดับพลังงานมาเป็นตัวแปรเสริมในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูล และในส่วนของการตรวจจับความคับคั่งงานวิจัย CcEbH ได้สร้างสมการสำหรับการคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้หน่วยความจำในช่วง 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นโดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอถึงนัยสำคัญของเวลาที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้หน่วยความจำดังสมการ

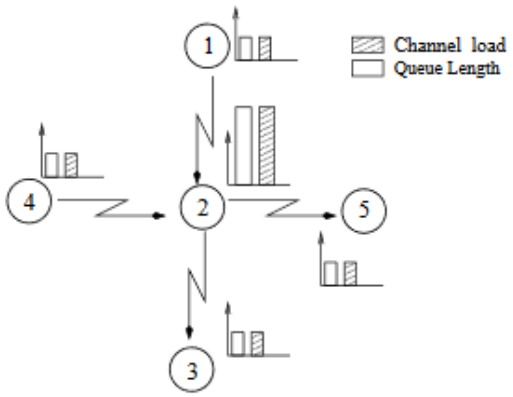
$$Till = \frac{(80 - 50\%) \times Qule}{Rera - Fora} \qquad (1)$$

สมการที่ 1 แสดงตัวอย่างการคำนวณเวลาที่เพิ่มขึ้นของการใช้หน่วยความจำจาก 50 – 80 % *(Till)* โดยกำหนดให้ *Qule* คือ ขนาดของหน่วยความจำ (Buffer size) *Rera* คืออัตราการรับข้อมูล (Receiving rate) และ *Fora* คืออัตราการส่งข้อมูล (Forwarding rate) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการแจ้งเตือนการเกิดความคับคั่งของข้อมูลต่อไป

3.4) CODA: Congestion Detection and Avoidance in sensor networks [20]

งานวิจัย CODA นี้ถูกเสนอขึ้นในปี 2003 โดย Wan และคณะได้ทำการนำเสนอโปรโตคอลเพื่อการตรวจจับและหลีกเลี่ยงสถานะการการเกิดความคับคั่งของของมูลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายซึ่ง CODA ให้หลักการของการนำค่าความจุช่องสัญญาณ (Channel load) สองค่าคือค่าในอดีตและค่าปัจจุบันทำการปรับตั้งค่าระดับการแจ้งเตือนสภาวะการเกิดความคับคั่งของข้อมูลในเครือข่าย โดยนำมาพิจารณาร่วมกับค่าการใช้ความจุของหน่วยความจำ (Queue Length)

ดังภาพที่ 4 แสดงให้เห็นถึงค่าระดับความสัมพันธ์ของค่าความจุช่องสัญญาณและค่าการถือครองหน่วยความจำโดยเมื่อโหนดหมายเลข 1 และ 4 ทำการส่งข้อมูลไปยังโหนดหมายเลข 2 เพื่อส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดหมายเลข 3 และ 5 จะพบว่าโหนดหมายเลข 2 มีค่าระดับการใช้ช่องสัญญาณและค่าการถือครองหน่วยความจำสูงจนอาจก่อให้เกิดปัญหาความคับคั่ง



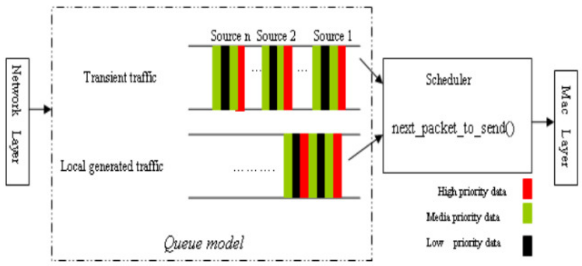
ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการเกิดความคับคั่งข้อมูบบนโหนดหมายเลข 2

โดยขั้นตอนวิธี CODA จะทำงานเมื่อค่าระดับการแจ้งเตือนอยู่ในสถานะที่อาจเกิดความคับคั่ง CODA จะส่งข้อมูลแจ้งเตือนไปยังโหนดส่งข้อมูล (Upstream) ในลักษณะของ

Hop-by-hop backpressure เพื่อทำการปรับลดอัตราการส่งข้อมูลลง แต่ในกรณีที่มีความคับคั่งเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โหนดที่ทำหน้าที่เป็นสถานีฐานจะทำหน้าที่ควบคุมความคับคั่งโดยการส่งแพ็กเกตตอบรับ (ACK) ไปให้กับโหนดที่ต้องการรับเข้ามูล ซึ่งการใช้หลักการของการส่งข้อมูลแจ้งเตือนแบบ ACK และ Backpressure ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมากอีกทั้ง CODA ยังใช้หลักการปรับอัตราการรับส่งข้อมูลแบบ Additive Increase Multipartite Decrease (AIMD) ทำให้มีโอกาสที่แพ็กเกตจะสูญหายระหว่างทางได้มาก

3.5) Enhanced congestion detection and avoidance (ECODA) [21]

งานวิจัยด้านการตรวจจับและหลีกเลี่ยงการเกิดความคับคั่งของข้อมูล ECODA ถูกนำเสนอขึ้นในปี 2010 โดย Tao และ Yu โดยใช้หลักการสร้างเกณฑ์วัดระดับขีดความสามารถของหน่วยความจำสำรอง buffer ทั้งสองส่วนคือ บัฟเฟอร์ของการรับข้อมูล (Incoming buffer) และบัฟเฟอร์ของการส่งต่อข้อมูล (Outgoing buffer) และนำมาพิจารณาร่วมกับค่าน้ำหนักความยาวของคิวการรับและส่งต่อข้อมูล (Weighted queue length)



ภาพที่ 5 การจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลในขั้นตอนวิธี ECODA

จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นถึงโมเดลการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลที่อยู่ในคิวการรับส่งของ ECODA ซึ่งมีการแบ่งข้อมูลออกเป็นสามระดับ ซึ่งหลักการทำงานของ ECODA ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักโดยในส่วนแรกใช้เกณฑ์วัดระดับการเกิดความคับคั่งของข้อมูลโดยคำนวณจากบัฟเฟอร์สองส่วนร่วมกับค่าน้ำหนักของคิว ในส่วนที่สองใช้ตารางตัวจัดคิวแบบยืดหยุ่นตามลำดับความสำคัญของแพคเก็ตและในส่วนที่สามเป็นส่วนจัดการความคับคั่งข้อมูลโดยการส่งคำสั่งให้โหนดต้นทางที่ทำการส่งข้อมูลอยู่ในขณะนั้นปรับลดอัตราการส่งข้อมูลลงจนกว่าสถานการณ์ความคับคั่งจะคลี่คลาย

3.6) A hop-by-hop congestion control protocol for wireless sensor networks (SenTCP) [22]

ในปี 2005 Wang และคณะได้นำเสนอโปรโตคอล SenTCP ซึ่งใช้ขั้นตอนวิธีการจัดการปัญหาความคับคั่ง TC โดยเน้นที่การเกิดความคับคั่งบริเวณโหนดระหว่างทาง ในการตรวจสอบความคับคั่งนั้น SenTCP จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการให้บริการทั้งหมด Packet service time (Delay) ร่วมกับค่าเฉลี่ยความหน่วงเวลาระหว่างจุดต่อจุด (One-hop delay) และอัตราการถือครองหน่วยความจำบัฟเฟอร์)Buffer occupancy (เพื่อใช้ในการกำหนดระดับการเกิดความคับคั่ง และในการแจ้งเตือนการเกิดความคับคั่งนั้นSenTCP ใช้วิธีการส่งการแจ้งเตือนโดยการส่งระดับการเกิดความคับคั่งเข้าไปส่วนแพ็กควบคุม (Control message) เมื่อโหนดต้นทางได้รับข้อความแจ้งเตือนการเกิดความคับคั่งจะทำการปรับลดอัตราการส่งข้อมูล ขั้นตอนของ SenTCP สามารถแก้ไขสถานการณ์ความคับคั่งได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากการใช้การแจ้งเตือนการเกิดความคับคั่งแบบทางตรง (Explicit) จึงส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงงาน

การจัดการความคับคั่งข้อมูลโดยใช้เทคนิคการจัดการคิวและลำดับความสำคัญ Queue-assisted and Priority-aware congestion control

เทคนิคการจัดการคิวนิยมใช้กันมาอย่างยาวนานนับตั้งแต่มีการเชื่อมต่อเครือข่ายคอมพิวเตอร์เนื่องจากมีขั้นตอนการทำงานที่เรียบง่ายโดยอาศัยหลักการปรับอัตราการส่งข้อมูลอย่าง AIMD เพื่อให้จำนวนคิวของโหนดมีขนาดที่สั้นที่สุดถึงแม้ว่าเทคนิคการจัดการคิวจะมีประสิทธิภาพในเรื่องของการให้บริการไม่มากนักแต่เป็นขั้นตอนวิธีที่เรียบง่ายและประหยัดการใช้พลังงานเป็นอย่างมากและนอกจากการจัดการคิวแล้วอีกเทคนิคหนึ่งที่มีความเรียบง่ายเช่นเดียวกันคือการใช้เทคนิคการจัดลำดับความสำคัญในการส่งผ่านข้อมูลโดยให้บริการกับข้อมูลที่มีความสำคัญก่อนเสมอ

3.7) DPCC dynamic prediction congestion control (DPCC) [23]

ในปี 2011 Heikalabad et al. ได้นำเสนอผลงานวิจัยในเรื่องแนวทางการพยากรณ์การเกิดสภาวะความคับคั่งของข้อมูลโดย

มุ่งเน้นที่การพยากรณ์การเกิดความคับคั่งในเซ็นเซอร์โหนดที่ครอบคลุมทั้งหมดในเครือข่ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลและลดโอกาสการสูญเสียข้อมูลระหว่างทางโดยการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลอย่างเป็นธรรมและควบคุมการเกิด Overhead ให้อยู่ในระดับต่ำ โดยที่ DPCC มีองค์ประกอบที่สำคัญสามส่วนคือส่วนแรกเป็นส่วนของการเลือกโหนดในการรับหรือส่งข้อมูล ส่วนที่สองเป็นส่วนในการตรวจจับและการพยากรณ์การเกิดความคับคั่งและส่วนที่สามเป็นส่วนที่ใช้ในการปรับอัตราการรับส่งและจัดลำดับความสำคัญของข้อมูล

โดยที่การเลือกโหนดที่มีหน้าที่รับส่งข้อมูลจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์โอกาสการเกิดความคับคั่งโดยพิจารณาจาก Queue utilization ซึ่งใช้ตัวแปรสองชนิดคือ Unoccupied Buffer Size (UBSi) และ Traffic rate ซึ่งเมื่อมีการเลือกโหนดที่จะรับส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังสถานีฐานจะเปรียบสมือนการสร้างเส้นทางในการรับส่งข้อมูลนั้นเป็นการเฉพาะ โหนดที่ถูกเลือกจะไม่รับข้อมูลจากโหนดอื่น ๆ เพื่อป้องกันการเกิดความคับคั่งและในขั้นตอนการส่งข้อมูลจะมีการเรียงลำดับการให้บริการข้อมูลก่อนหลังตามลำดับความสำคัญและพยายามปรับค่าอัตราการส่งข้อมูลให้ได้อัตราที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้อยู่เสมอ

3.8) Healthcare Aware Optimized Congestion Avoidance (HOCA) [24]

ในปี 2014 Rezaee และคณะได้นำเสนอแนวคิดการจัดการความคับคั่งข้อมูลแบบรวมศูนย์โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดการคิวแบบแอคทีฟ (Active Queue managements - AQM) ซึ่งงานวิจัย HOCA ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ใช้ในทางการแพทย์ โดยมุ่งเน้นที่การแก้ไขปัญหาความคับคั่งของข้อมูลโดยพิจารณาถึง ค่าความหน่วงระหว่างการส่งข้อมูลจากจุดเริ่มต้นถึงปลายทางการจัดการด้านพลังงานและขีดความสามารถสูงสุดในการให้บริการ โดยใช้หลักการการส่งข้อมูลแบบหลายเส้นทาง (Multipath) และการ QoS แบ่งข้อมูลออกเป็นสองประเภทได้แก่ Sensitive traffic เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญและได้รับการบริการส่งต่อก่อนเสมอและ Non-sensitive traffic เป็นข้อมูลทั่วไป ซึ่ง HOCA มีขั้นตอนการทำงาน 4 ขั้นตอนโดยเริ่มจากสถานีฐานทำการส่งข้อมูลแบบบรอดคราสเพื่อร้องขอข้อมูลจากเซ็นเซอร์โหนด และในขั้นตอนที่สองเซ็นเซอร์โหนดจะทำการส่งข้อมูลกลับไปยังสถานีฐานจากนั้นสถานีฐานจะทำการกำหนดเส้นทางการส่งข้อมูลและแบ่งประเภทข้อมูลเป็นสองประเภทจากนั้นจึงทำการส่งข้อมูลโดยใช้เกณการควบคุมการเกิดความคับคั่งด้วย AQM และการปรับเพิ่มลดอัตราการส่งข้อมูลในแบบ (Traffic control)

3.9) A fuzzy logical controller for traffic load parameter with priority-based rate in wireless multimedia sensor networks (FLC) [25]

แนวคิดการจัดการคิวและลำดับค่าความสำคัญไม่ได้จำกัดอยู่แต่เฉพาะการใช้วิธีการคำนวณเพื่อกำหนดเกณฑ์จากตัวแปรที่ระบุโอกาสการเกิดความคับคั่งเท่านั้นยังมีแนวคิดการใช้เทคนิคการประมวลผลแบบอ่อนมาช่วยในการตัดสินใจ โดยในปี 2014 Chen และ Lai ได้มีการนำเสนองานวิจัยโดยใช้เทคนิคทางการคำนวณแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic) เพื่อพิจารณาตัวแปรที่มีผลเกี่ยวเนื่องกับขีดความสามารถในการส่งข้อมูล (Traffic load parameter - TLP) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือจะอยู่ในรูปของค่าน้ำหนักเพื่อลำดับความสำคัญในการปรับเพิ่มลดอัตราการส่งข้อมูล (Exponential weighted priority-based rate control (EWPBRC).) โดยจุดเด่นของงานวิจัยนี้อยู่ที่การปรับสมดุลระหว่างอัตราส่วนการรับข้อมูลของโหนดที่เกิดความคับคั่งให้สมดุลกับขีดความสามารถในการส่งต่อข้อมูลนอกจากนั้นแล้วยังได้มีการนำเสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการโดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มตามลำดับความสำคัญ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า FLC สามารถลดภาระการใช้ทรัพยากรในเครือข่ายได้

4. เปรียบเทียบและอภิปรายงานวิจัย

ในส่วนนี้จะเป็นการอภิปรายและเปรียบเทียบงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ตารางเปรียบเทียบงานวิจัย

งานวิจัย	เทคนิคที่ใช้	ข้อดี	ข้อจำกัด
TARA [16]	RC	สามารถส่งข้อมูลในอัตราที่สูง	สิ้นเปลืองพลังงานโดยเฉพาะในบริเวณ Distribute และ Merge node

HTAP [17]	RC	อัตราการส่งข้อมูลถึงปลายทางอยู่ในระดับดี	เกิดดีเลย์ในขั้นตอนการสร้างโครงข่ายลำดับชั้น
DAIPaS [18]	RC	สามารถส่งข้อมูลได้ในปริมาณมาก	สิ้นเปลืองพลังงานจากการที่ต้องเปลี่ยนทิศทางการส่งข้อมูล
CcEbH [19]	RC	สามารถกระจายการใช้พลังงานไปยังโหนดต่างๆได้ดี เครือข่ายมีอายุการใช้งานยาวนาน	ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความคับคั่งและขั้นตอนวิธีในการกระจายการใช้พลังงานมีความซับซ้อนในการประมวลผล
CODA [20]	TC	มีความซับซ้อนต่ำ	โหนดแต่ล่ะโหนดได้รับการจัดสรรทรัพยากรที่ไม่เท่ากัน
ECODA [21]	TC	มีความซับซ้อนต่ำ ประสิทธิภาพอยู่ในระดับน่าพอใจ	แพ็กเกตสูญหายมีการส่งข้อมูลพร้อมกันจำนวนมาก
SenTCP [22]	TC	สามารถจัดการปัญหาความคับคั่งได้อย่างรวดเร็ว	สิ้นเปลืองพลังงาน
DPCC [23]	Queue	มีความซับซ้อนในการประมวลผลสูง	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับปานกลาง
HOCA [24]	Queue	มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ	โหนดแต่ล่ะโหนดได้รับการจัดสรรทรัพยากรที่ไม่เท่ากัน
FLC [25]	Queue	โหนดแต่ล่ะโหนดสามารถให้บริการส่งต่อข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก	มีโอกาสที่ข้อมูลที่อยู่ในลำดับความสำคัญที่ต่ำจะถูกตัดออก

จากตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่างานวิจัยที่ใช้วิธีการจัดการและควบคุมความคับคั่งด้วยวิธี RC จะสามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลแต่ยังคงมีข้อจำกัดระยะเวลาในการส่งข้อมูลเนื่องจากในการเปลี่ยนเส้นทางบางครั้งอาจใช้เส้นทางที่อ้อมกว่าการจัดการความคับคั่งแบบ TC ซึ่ง TC มีจุดเด่นในเรื่องของการจัดการความคับคั่งได้อย่างรวดเร็วแต่ก็ต้องแลกมาด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ลดลงและโอกาสที่แพ็กเกตจะสูญหายในช่วงเริ่มต้นของการจัดการความคับคั่ง ซึ่งวิธีการ TC เป็นวิธีการที่ต้องรอให้ความคับคั่งเกิดเสียก่อนจึงเริ่มต้นลดอัตราการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางได้

ในขณะเดียวกันเทคนิคการจัดการคิวและการลำดับความสำคัญเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้เสริมของทั้ง RC และ TC ในกระบวนการจัดการความคับคั่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการความคับคั่งขอ

3.5 สรุป

การจัดการคามคับคั่งของข้อมูลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นมีลักษณะที่แตกต่างจากการจัดการความคับคั่งบนเครือข่ายชนิดอื่นเนื่องจากบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นประกอบด้วยโหนดเป็นจำนวนมากที่ทำการส่งข้อมูลระหว่างกันทำให้มีโอกาสที่จะเกิดความคับคั่งขึ้นได้โดยง่ายความคับคั่งเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลหากเกิดความคับคั่งขึ้นข้อมูลมีโอกาสสูญหายในระหว่างการส่งต่อข้อมูลกันระหหว่างโหนดด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการคิดค้นวิธีการจัดการความคับคั่งโดยแต่เดิมได้มีการประยกต์ใช้ขั้นตอนวิธี TC ซึ่งปรับปรุงมาจากการจัดการความคับคั่งบนเครือข่ายความพิวเตอร์โดยอาศัยการปับลดอัตราการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางเป็นหลัก ต่อมาได้มีการพัฒนาขั้นตอนการจัดการความคับคั่งด้วยวิธีการ RC โดยอาศัยความยืดหยุนในด้านโครงสร้างทำการปรับเปลี่ยนเส้นทางเพื่อเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลและหลีกเลี่ยงการเกิดความคับคั่ง

นอกจากนั้นแล้วยังได้มีการนำเสนอเทคนิคกการจัดการคิวและการลำดับความสำคัญของข้อมูลมาเป็นตัวช่วยเสริมในการจัดการความคับคั่งซึ่งเทคนิคต่างๆที่ได้กล่าวมานี้ล้วนแล้วแต่มีทั้งข้อดีและข้อจำกัดเป็นการเฉพาะของตนเอง ทำให้มีงานวิจัยนำเสนอเทคนิคเพื่อลดข้อจำกัด และเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการและควบคุมความคับคั่ง

เอกสารอ้างอิง

1) Gartner. “Press Release - Gartner Says 8.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016”. [online] http://www.gartner.com/newsroom/id/3598917 (Accessed 20 June 2017).
2) Intel. “A Guide to the Internet of Things Infographic”. [online] https://www.intel.com/content/www/us/en/internet-of-things/infographics/guide-to-iot.html (Accessed 20 June 2017).
3) Abiresearch . “More Than 30 Billion Devices Will Wirelessly Connect to the Internet of Everything in 2020”. [online] https://www.abiresearch.com/press/more-than-30-billion-devices-will-wirelessly-conne/ (Accessed 20 June 2017).
4) Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. Computer networks, 52(12), 2292-2330.
5) Mahmood, M. A., Seah, W. K., & Welch, I. (2015). Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead. Computer Networks, 79, 166-187.
6) Li, M., Li, Z., & Vasilakos, A. V. (2013). A survey on topology control in wireless sensor networks: Taxonomy, comparative study, and open issues. Proceedings of the IEEE, 101(12), 2538-2557.
7) Rathnayaka, A. D., & Potdar, V. M. (2013). Wireless sensor network transport protocol: A critical review. Journal of Network and Computer Applications, 36(1), 134-146.
8) Kafi, M. A., Djenouri, D., Ben-Othman, J., & Badache, N. (2014). Congestion control protocols in wireless sensor networks: a survey. IEEE communications surveys & tutorials, 16(3), 1369-1390.
9) Ghaffari, A. (2015). Congestion control mechanisms in wireless sensor networks: A survey. Journal of network and computer applications, 52, 101-115.
10) Sergiou, C., Antoniou, P., & Vassiliou, V. (2014). A comprehensive survey of congestion control protocols in wireless sensor networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16(4), 1839-1859.
11) Shah, S. A., Nazir, B., & Khan, I. A. (2016). Congestion control algorithms in wireless sensor networks: Trends and opportunities. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences.
12) Younis, M., Senturk, I. F., Akkaya, K., Lee, S., & Senel, F. (2014). Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey. Computer Networks, 58, 254-283.
13) Rawat, P., Singh, K. D., Chaouchi, H., & Bonnin, J. M. (2014). Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. The Journal of supercomputing, 68(1), 1-48.
14) Aziz, A. A., Sekercioglu, Y. A., Fitzpatrick, P., & Ivanovich, M. (2013). A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery poered wireless sensor networks. IEEE communications surveys & tutorials, 15(1), 121-144.
15) Pantazis, N. A., Nikolidakis, S. A., & Vergados, D. D. (2013). Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. IEEE Communications surveys & tutorials, 15(2), 551-591.
16) Wan, C. Y., Eisenman, S. B., & Campbell, A. T. (2003, November). CODA: Congestion detection and avoidance in sensor networks. In Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (pp. 266-279). ACM.
17) Tao, L. Q., & Yu, F. Q. (2010). ECODA: enhanced congestion detection and avoidance for multiple class of traffic in sensor networks. IEEE transactions on consumer electronics, 56(3).
18) Kang, J., Zhang, Y., & Nath, B. (2007). TARA: topology-aware resource adaptation to alleviate congestion in sensor networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 18(7).
19) Sergiou, C., Vassiliou, V., & Paphitis, A. (2013). Hierarchical Tree Alternative Path (HTAP) algorithm for congestion control in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 11(1), 257-272.
20) Sergiou, C., Vassiliou, V., & Paphitis, A. (2014). Congestion control in Wireless Sensor Networks through dynamic alternative path selection. Computer Networks, 75, 226-238.
21) Chen, W., Niu, Y., & Zou, Y. (2016). Congestion control and energy-balanced scheme based on the hierarchy for WSNs. IET Wireless Sensor Systems, 7(1), 1-8.
22) Yueming, H., Yueju, X., & Bo, L. (2005). SenTCP: A Hop-by-Hop Congestion Control Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proc. of IEEE INFOCOM (Vol. 5, pp. 162-170).
23) Heikalabad, S. R., Ghaffari, A., Hadian, M. A., & Rasouli, H. (2011). DPCC: Dynamic Predictive Congestion Control in wireless sensor networks.

IJCSI International Journal of Computer Science Issues, 8(1).
24) Rezaee, A. A., Yaghmaee, M. H., Rahmani, A. M., & Mohajerzadeh, A. H. (2014). HOCA: Healthcare Aware Optimized Congestion Avoidance and control protocol for wireless sensor networks. Journal of Network and Computer Applications, 37, 216-228.
25) Chen, Y. L., & Lai, H. P. (2014). A fuzzy logical controller for traffic load parameter with priority-based rate in wireless multimedia sensor networks. Applied Soft Computing, 14, 594-602.