



การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ และผลกระทบต่อทางชีวภาพ

วรรณา จงจิตรไพศาล พงศ์เทพ วิวรรณะเดช

ภาควิชาเวชศาสตร์ชุมชน คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทคัดย่อ

โทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันสามารถตอบสนองชีวิตที่ทันสมัยและสะดวกสบาย ทำให้มีการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเหล่านี้ก็ทำให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์ บทความนี้จึงเป็นการแสดงผลกระทบทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งอาศัยการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟ ในกลุ่ม non-ionizing โดยมีพลังงานไม่มากพอในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดผลกระทบทางชีวภาพที่ไม่ใช่ความร้อน โดยเฉพาะระบบประสาทซึ่งเป็นอวัยวะทางไฟฟ้าที่มีภาวะไม่เสถียร ร่วมกับการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งเป็นแหล่งแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใกล้กับศีรษะมากที่สุด อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าที่ทางระบบประสาท ได้แก่ ความผิดปกติของรหัสยีน ความผิดปกติของ blood brain barrier การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเซลล์ รบกวนเมตาบอลิซึม และพบความผิดปกติของคลื่นไฟฟ้าสมอง เป็นต้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงหน้าที่ทางประสาทและเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมแบบชั่วคราว โดยเฉพาะอาการปวดศีรษะที่พบบ่อยที่สุด สิ่งสำคัญคือ ควรมีมาตรการในการป้องกันที่ชัดเจน แม้ว่าปัจจุบันความรู้ด้านผลกระทบทางชีวภาพของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้ายังไม่มีที่ชัดเจน

คำสำคัญ: การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โทรศัพท์เคลื่อนที่ ผลกระทบทางชีวภาพ

ผู้พิมพ์หลัก:

วรรณา จงจิตรไพศาล

ภาควิชาเวชศาสตร์ชุมชน คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

110 ถ.อินทราโรส ต.ศรีภูมิ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

อีเมล: occenv.apple@gmail.com

Electromagnetic radiation from mobile phone and its biological effect

Wanna Chongchitpaisan, Phongtape Wiwatanadate

Department of Community Medicine, Faculty of Medicine, Chiang Mai University

Abstract

As the mobile phone responds to modern lifestyle and makes life convenience, its use has increased greatly. On the other hand this technology could affect humans. This article reviews the biological effects from this equipment. The functioning of a mobile phone is to generate microwave frequency radiation (MFR) which is non-ionizing radiation. This MFR is low energy and not enough to induce heat. So, MFR affect biological system by non-thermal effects. The mobile phone is a source generated electromagnetic radiation close to the user's head. Thus, the neurological system, which is a non equilibrium electrical organ, can be subject to alteration such as effects to the genetic modification, blood brain barrier, cell structure change, metabolism interference and abnormal electroencephalography pattern, etc. The mobile phone effect is transient change in term of function and behavior of users. Headache is the most frequently occurring symptom in users. At present, the knowledge of biological effect of electromagnetic radiation is still inconclusive. Therefore, preventive strategies should be performed.

Keywords: electromagnetic radiation, mobile phone, biology effect

Corresponding author:

Wanna Chongchitpaisan

Department of Community Medicine,

Faculty of Medicine, Chiang Mai University

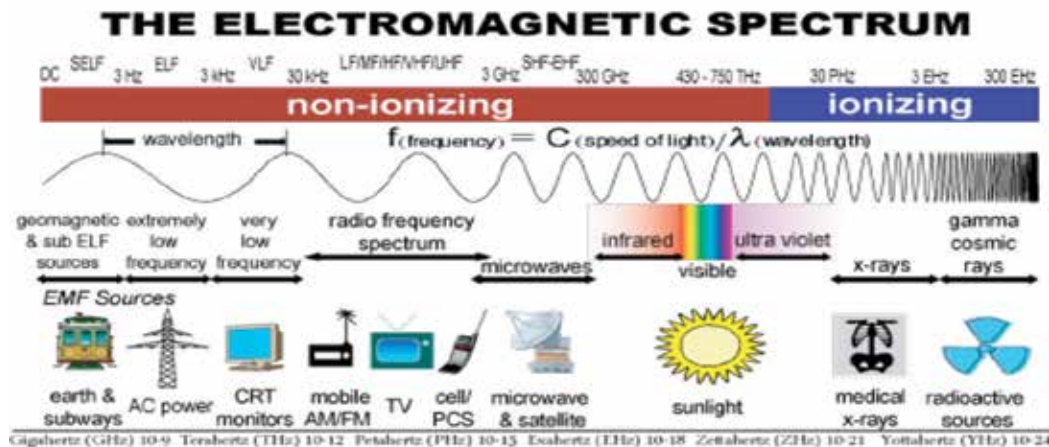
110 Inthavaroros road, Sriphum sub-district, Mueang Chiang Mai province 50200

E-mail: occenv.apple@gmail.com

■ บทนำ

การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสาร โดยเฉพาะโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างหลากหลาย สร้างการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของสังคมโลก สู่วิวัฒนาการของโลกไร้พรมแดนทั้งในด้านสังคม วัฒนธรรม เศรษฐกิจ การเมืองการปกครอง การศึกษา ที่สามารถเชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบ

โดยพบว่าขยะจากอุปกรณ์และโทรศัพท์เคลื่อนที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ท้าทายสำคัญในศตวรรษที่ 2 ซึ่งการทำงานของโทรศัพท์เคลื่อนที่เหล่านี้ใช้ประโยชน์จากการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation: EMR) ทำให้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมและอยู่รอบตัวมนุษย์ เรียกว่า electromagnetic smog⁵



รูปที่ 1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จำแนกตามความยาวและความถี่คลื่น

ที่มา (<http://studycom/academy/lesson/what-are-gamma-rays-definition-examples-quizhtml>)

และเป็นสากล สามารถกระตุ้นการเติบโตทางธุรกิจขนาดเล็ก มีการพัฒนาระบบการศึกษา กระตุ้นให้เกิดการเรียนรู้เพิ่มขึ้น¹ ทำให้เกิดการพัฒนาระบบความคิดที่แก้ปัญหาได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว² สร้างความสัมพันธ์ในครอบครัวเพิ่มขึ้นและสร้างความบันเทิงได้หลากหลายรูปแบบ ตอบสนองสังคมออนไลน์และผู้ใช้งานได้ทุกวัยในยุคดิจิทัลและทำให้ได้รับความนิยมมากที่สุด มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าในปี ค.ศ. 2016 อุตสาหกรรมเทคโนโลยีการสื่อสาร จะมีการจำหน่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ถึง 2.6 พันล้านเครื่อง คิดเป็น 1.4 เครื่อง/คน³ สำหรับประเทศไทย คาดการณ์ว่าตลาด smartphone จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 24.9⁴ การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีการสื่อสารเหล่านี้ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากทั้งสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสุขภาพ สังคม และวัฒนธรรม

โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการแผ่รังสีในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเป็นตัวนำพลังงานแพร่ออกไปในบรรยากาศ ซึ่งเป็นการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ในย่านไมโครเวฟ (1 GHz ขึ้นไป) (microwave frequency radiation: MFR) เป็นกลุ่มเฉพาะในช่วงความถี่วิทยุ radio frequency: RF (3 kHz-300 GHz) จำแนกตาม electromagnetic spectrum⁶ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระบบเซลลูลาร์ ซึ่งมีการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ไมโครเวฟ ระหว่างเสาสัญญาณในโทรศัพท์และสถานีสัญญาณ ถ้าโทรศัพท์เคลื่อนที่ไม่สามารถหาช่องสัญญาณระหว่างการสื่อสารได้ โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่จะขึ้นว่า “no service” และถ้ามีการเคลื่อนที่ระหว่างการสนทนา โทรศัพท์เคลื่อนที่ปลายทางจะเปลี่ยนไปใช้ช่องสัญญาณของสถานีฐานใหม่ให้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า “hand over”⁸ โดยระบบของโทรศัพท์ที่พบบ่อย^{7, 8}

ได้แก่ ระบบ GSM (global system for mobile communications) โดยมีช่วงความถี่ 900 MHz 1,800 MHz และระบบ UMTS (universal mobile telecommunications system) เป็นระบบโทรศัพท์เทคโนโลยี 3G มีช่วงความถี่ 2,200 MHz ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาเป็นระบบ 4G

การประเมินการสัมผัส MFR จากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์มักจะประเมินโดยการคำนวณอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (specific absorption rate: SAR) ในเนื้อเยื่อมนุษย์ซึ่งเป็นการวัดอัตราปริมาณการดูดกลืนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา ต่อหน่วยมวลของร่างกาย ในปริมาตรของความหนาแน่นที่กำหนด แสดงหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg) หรือมิลลิวัตต์ต่อกรัม (mW/g) ซึ่งเป็นค่าเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่จุดหนึ่งโดยปริมาณ SAR ที่มีค่า 4 W/kg จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °C^{9, 10} ซึ่งมีการคำนวณตามสมการ

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (1)$$

σ เป็นค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ หน่วยเป็น S/m

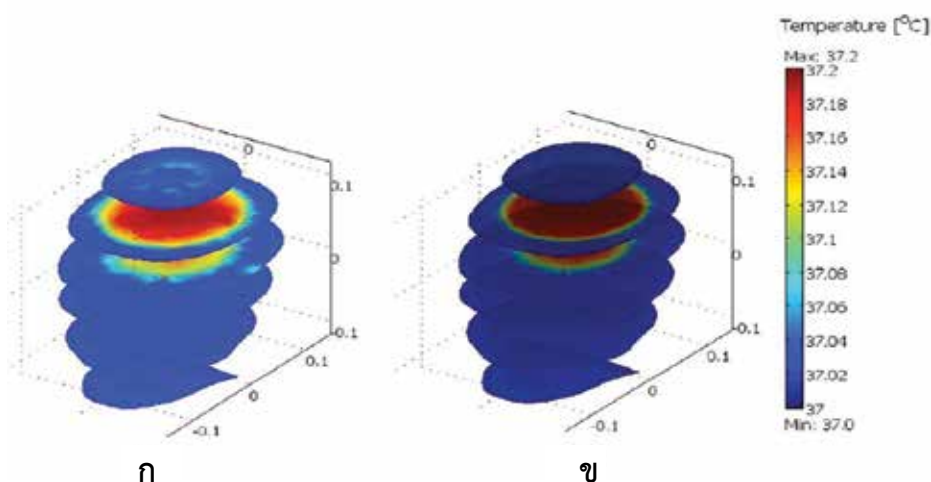
ρ เป็นค่าความหนาแน่นมวลของเนื้อเยื่อ หน่วยเป็น kg/m

E เป็นค่าความแรงสนามไฟฟ้า หน่วยเป็น V/m

ค่า SAR จะถูกทำการประเมินภายใต้การรับสัมผัสที่มากที่สุดเพื่อรับประกันความปลอดภัยในการสัมผัส

MFR จากการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ การประมาณค่า SAR ต้องใช้ความเชี่ยวชาญ มีวิธีการที่ซับซ้อนและใช้เวลามาก ไม่สามารถวัดหรือคำนวณโดยใช้เครื่องมือปกติหรือการตรวจทางห้องทดลอง ซึ่งในสถานการณ์จริงการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ปกติไม่ได้สัมผัสกำลังส่งออกที่มากที่สุดตลอดเวลา การประเมินการสัมผัส MFR จากโทรศัพท์เคลื่อนที่จึงต้องประเมินจากกำลังส่งออกของโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามเวลาที่มีการใช้โทรศัพท์ที่แท้จริง¹¹ ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาการวัดกำลังการส่งออกในรูปของซอฟต์แวร์หรือชุดคำสั่งในระบบซึ่งทำการบันทึกการกระจายของระดับกำลังส่งออกที่เชื่อมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังนั้นการวัด MFR ที่มีผลกระทบต่อโรคเรื้อรังหรือโรคที่เกิดจากการสะสมทั้งชีวิตมักใช้การวัด SAR ขณะที่ผลกระทบ ที่เกิดเป็นแบบเฉียบพลันเกิดแบบครั้งคราว เช่น อาการปวดศีรษะ ปัญหาการนอนหลับจะทำการวัดกำลังส่งออก

ผลกระทบทางชีวภาพจากการสัมผัส MFR เป็นการแผ่รังสีชนิด non-ionizing มีผลกระทบทางชีวภาพ 2 ด้าน คือ thermal effects และ non-thermal effect¹² ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่สนใจการเกิดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในเนื้อเยื่อชีวภาพ โดยความร้อนในเนื้อเยื่อชีวภาพที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางชีวภาพและกำลังความเข้มของการแผ่รังสีที่แพร่เข้าสู่ร่างกาย ระยะเวลากการสนทนาและระยะทางของโทรศัพท์เคลื่อนที่และอวัยวะที่สัมผัส^{12,13}



รูปที่ 2 การกระจายความร้อนจากการสัมผัสกำลัง 1 W ความถี่ 900 MHz ที่ (ก) ระยะ 0 เซนติเมตร และ (ข) 1 เซนติเมตร¹⁵

MFR จากโทรศัพท์เคลื่อนที่มีพลังงานไม่เพียงพอในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนหรืออุณหภูมิร่างกายเพิ่มขึ้น¹³ ขณะที่ระบบประสาทมีการทำงานภายใต้กระบวนการทางไฟฟ้าซึ่งสามารถเกิดการสอดแทรกจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับจากภายนอกและทำปฏิกิริยากับเซลล์ในระดับโมเลกุลหรือระดับเนื้อเยื่อ¹³ แรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับเม็ดเลือด (blood corpuscle) หรือโมเลกุลโปรตีน ทำให้เกิดผลกระทบชนิด non-thermal effect เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางชีวภาพภายในเซลล์ (cytoplasm) โครงสร้างและหน้าที่ในเซลล์ นอกจากนี้เยื่อหุ้มเซลล์ที่มีลักษณะเป็นวงจร เมื่อพบกับกระแสไฟฟ้าความถี่สูงจะทำให้เกิดการกระตุ้นเยื่อหุ้มของเส้นประสาทในสมอง อย่างไรก็ตามผลกระทบที่ไม่ใช่ความร้อนยังมีข้อมูลไม่ชัดเจนและยังมีการโต้แย้งกันอยู่^{12, 14-16}

การศึกษาส่วนใหญ่พบว่าผลกระทบที่ตอบสนองทางชีวภาพของระบบประสาท มักทำให้เกิดความผิดปกติของ gene coding การเปลี่ยนแปลงของอนุมูลอิสระ ความผิดปกติของเยื่อหุ้มเซลล์และ Blood-Brain Barrier (BBB) สารสื่อประสาทและการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างเซลล์ รวมทั้งการตรวจพบความผิดปกติของคลื่นไฟฟ้าสมอง และแสดงผลในด้านการเปลี่ยนแปลงทางด้านจิตใจ เช่น ความจำ การเรียนรู้ และการรับรู้¹⁶ ดังนี้

1. ผลกระทบต่อระบบการควบคุมภายในเซลล์ การศึกษาส่วนใหญ่สนใจในด้านรหัสยีน (genes coding) แต่ผลยังไม่ชัดเจน และมีการศึกษาที่พบการเหนี่ยวนำระบบควบคุมวงจรเซลล์และการตายของเซลล์ (apoptosis) โดยพบว่า MFR ชนิดเรื้อรังจะเหนี่ยวนำให้เกิดผลกระทบต่อความเข้มข้นของแคลเซียมหลุดออกจากเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในไซโตซอล (cytosol) ซึ่งเป็นของเหลวภายในเซลล์และเกี่ยวข้องกับกระบวนการรวมตัวของโครมาติน (chromatin) ซึ่งมีผลต่อยีน โดยส่งเสริมการเปิดช่องทางแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ของเยื่อพลาสมาของเซลล์ที่สัมผัส ซึ่งทำให้แคลเซียมไอออนไหลทะลักเข้าในเซลล์เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณแคลเซียมไอออนภายในเซลล์เพิ่มจำนวนอย่างมากมาย และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของเซลล์สมองจากการสัมผัส MFR โดยพบ

การตอบสนองที่กำลังเข้มข้น 1 และ 10 W/m^2 ซึ่งเป็นค่ากำลังเข้มข้นที่แสดงผล โดยไม่พบการตอบสนองที่กำลังเข้มข้นที่น้อยหรือมากกว่า มีการเปลี่ยนแปลง DNA เพิ่มขึ้นในสมองหลังการสัมผัส MFR ที่กำลังเข้มข้น 1 mW/cm^2 จากการสัมผัสซ้ำ ๆ ระยะเวลาสั้น และพบการทำลายยีนต่อ glial cells ทำลายยีนระบบประสาททำให้เกิดการเปลี่ยนหน้าที่และทำให้เร่งการเกิดโรคประสาทเสื่อมรวมทั้งพบการเปลี่ยนยีนอิเล็กทรอนิกส์ใน DNA และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงยีนนำไปสู่การแตกหักของ DNA ในเซลล์สมองเพิ่มขึ้นซึ่งนำไปสู่การตายของเซลล์ (apoptosis) เพิ่มขึ้นทำให้เกิดมะเร็ง¹⁶⁻²⁰

2. ผลกระทบต่อความเข้มข้นของอนุมูลอิสระ ในเซลล์อนุมูลอิสระเป็นโมเลกุล อะตอมหรือไอออน ที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว อนุมูลอิสระอาจมีประจุเป็นบวกลบหรือเป็นศูนย์ก็ได้โดยอนุมูลอิสระจะถูกสร้างขึ้นในเซลล์และมักอยู่ร่วมกับกระบวนการภายในเซลล์หลายระบบซึ่งมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาต่อโครงสร้างเซลล์ ทำให้เกิดเซลล์เสื่อม การมีอนุมูลอิสระมากเกินไปทำให้เกิด oxidative stress เหนี่ยวนำการทำลายช่องทางไอออนนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเซลล์และทำให้เกิดความแตกต่างของยีน เกิดการแตกหักของ DNA เพิ่มขึ้น เหนี่ยวนำการกลายพันธุ์ (mutation) และภาวะ Oxidative stress ทำให้เกิดโรคประสาทเสื่อม เช่น อัลไซเมอร์ (Alzheimer's), Huntington, พาร์กินสัน (Parkinson) เส้นเลือดแดงแข็งทำให้เกิดโรคหัวใจ และกระบวนการความแก่ (aging process) โดยการศึกษาในหนูทดลองที่สัมผัส MFR พบภาวะ oxidative damage โดยกลุ่มที่ได้รับสารสกัดใบแปะก๊วย (Ginkgo biloba) ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระก่อนการสัมผัสไม่พบการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อสมอง นอกจากนี้พบการสัมผัส MFR ทำให้ระดับไมโทคอนเดรีย DNA (mtDNA) และไมโทคอนเดรีย RNA (mtRNA) ลดลงแต่สามารถกลับเป็นปกติโดยการใช้เมลานินซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในสมอง รวมทั้งในการศึกษาที่พบว่าการสัมผัส MFR ทำให้เกิดภาวะ oxidative stress ในเนื้อเยื่อเลนส์ตาและทำให้เอ็นไซม์ที่ต่อต้านสารอนุมูลอิสระลดลง เช่น melatonin (Mel)

catalase (CAT) และ superoxide dismutase (SOD) glutathione peroxidase (GSH-Px) เป็นต้น¹⁶

3. ผลกระทบต่อเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) เยื่อหุ้มเซลล์ มีความหนา 10^{-6} เซนติเมตร มีลักษณะเป็นชั้นของขั้วไฟฟ้าที่แข็งแรง ยึดแน่นด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ มีความซับซ้อนและจะเกิดการสั่นเฉพาะที่บริเวณที่มีการปะทะของขั้วบวกและขั้วลบ ทำให้เกิดการแกว่งของขั้วไฟฟ้าซึ่งมีความถี่ $10^{11} - 10^{12}$ ครั้ง/นาที่ และทำให้เกิดความเร็วในชั้นของเยื่อหุ้มเซลล์มีขนาด $10^5 - 10^6$ เซนติเมตร/นาที่ โดยการทดลองจากการสัมผัส MFR ต่อเยื่อหุ้มเซลล์มักจะจะเป็นผลกระทบที่เยื่อหุ้มเซลล์ยอมให้โซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนซึมผ่านเพิ่มขึ้น โดย Liburdy RP ศึกษาในกระต่าย ให้สัมผัส MFR 2450 MHz ความเข้ม 400 mW/g พบว่า มีโซเดียมไอออนเพิ่มขึ้นและกลับเป็นปกติภายในเวลา 60 นาที โดยมักพบว่าผลจากการสั่นพ้อง (resonance) ซึ่งเกี่ยวข้องกับควมยาวคลื่นที่สอดคล้องกัน ส่งผลให้มีกำลังเข้มเพิ่มขึ้นและทำให้มีผลต่อการยอมให้ซึมผ่านของเยื่อหุ้ม โดยพบว่าการสัมผัสคลื่นที่มีความถี่ 49, 70 และ 76 GHz พบการยอมให้ซึมผ่านคลอไรด์เพิ่มขึ้นที่ความถี่ 41.5 GHz แต่ที่ความถี่ 71 GHz กลับพบการยอมให้ซึมผ่านลดลง โดยผลที่เกิดขึ้นพบว่าสามารถกลับเป็นปกติได้^{16,18}

4. ผลกระทบต่อ blood-brain barrier (BBB) ซึ่งเป็นเยื่อกั้นรอบสมองทำหน้าที่ป้องกันการแพร่กระจายโมเลกุลที่เป็นสารอันตรายผ่านเข้าไปในระบบประสาทส่วนกลาง การศึกษาที่สัมผัส MFR ที่ความเข้มสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสมอง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อ BBB การศึกษาของ Chang และคณะจากการทดลองในสุนัขที่สัมผัส MFR กำลังความเข้ม 30 mW/cm^2 พบว่าสุนัข 4 ใน 11 ตัวมีการเพิ่มขึ้นของการยอมให้ซึมผ่านของสารที่ฉีดเข้าสมอง แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่กำลังความเข้มอื่น และมีการศึกษาที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ BBB ที่สัมผัส MFR กำลังความเข้ม 0.5 mW/cm^2 แต่เมื่อเพิ่มกำลังความเข้มของ MFR จนทำให้อุณหภูมิในสมองเพิ่มขึ้นเป็น $40 - 45^\circ\text{C}$ จะพบการยอมให้ซึมผ่านของ BBB เพิ่มขึ้น โดยพบว่า

เมื่อทำให้ร่างกายเย็นลงก่อนการสัมผัส MFR จะทำให้ผลกระทบของ BBB จากการสัมผัส MFR ลดลง ดังนั้น MFR ที่ เหนียวนาให้อุณหภูมิในสมองเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถการยอมให้ซึมผ่านของ BBB อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Frey และคณะ พบว่ามีการยอมให้ซึมผ่านของ BBB เพิ่มขึ้นในสมองหนูจากการสัมผัส MFR ที่ความเข้มเฉลี่ยต่ำกว่า 0.2 mW/cm^2 ซึ่ง Oscar และ Hawkins สรุปว่าความสามารถการยอมให้ซึมผ่านของ BBB ที่เปลี่ยนแปลงเกิดจากพบการไหลเวียนของเลือดในสมองเฉพาะที่ของหนูทดลองเพิ่มขึ้นหลังการสัมผัส MFR ในระดับความเข้ม 1 และ 15 mW/cm^2 นำไปสู่การเปลี่ยนหน้าที่ของสมองทำให้เกิดภาวะสมองบวมมีความดันในสมองผิดปกติและเกิดการทำลายสมอง นอกจากนี้ Okonigene RE. เสนอว่าผลกระทบด้านความร้อนอาจเกิดจาก Hot spots ในสมอง แม้ว่าพลังงานรวมจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สูง อย่างไรก็ตามพบว่ามีหลายการศึกษาที่พบการเปลี่ยนแปลงของ BBB ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ^{16,21-22}

5. ผลกระทบต่อหน้าที่ของสารสื่อประสาท (neurotransmitter) สารสื่อประสาทเป็นสารเคมีที่มีหน้าที่ในการนำ การขยาย และควบคุมข้อมูลไปตามสัญญาณไฟฟ้าจากเซลล์ประสาทเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่ง โดยสารเคมีที่อยู่ในเซลล์ ถูกเรียกว่าเซลล์ประสาทก่อนไซแนปส์ (presynaptic neuron) และมีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้เกิดผลต่อเซลล์ประสาท หลังไซแนปส์ (postsynaptic neuron) การทำงานของสารสื่อประสาทมีกลไกทางชีวเคมีที่แตกต่างกันตามชนิดของสารสื่อประสาทในสมอง การศึกษาส่วนใหญ่จะสนใจการเปลี่ยนแปลงของสารสื่อประสาทจากการสัมผัส MFR ที่กำลังเข้มสูง เช่น แคทีโคลามีน (catecholamines) เซโรโทนิน (serotonin) และแอซิติลโคลีน (acetylcholine) โดยพบว่าการศึกษา MFR กำลังเข้ม 50 mW/cm^2 สัมผัสซ้ำ ๆ พบการหลั่งของ epinephrine ในสมองเพิ่มขึ้นและลดลงหลังการหยุดสัมผัส รวมทั้งพบความเข้มข้นของ norepinephrine และ dopamine เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาที่มีการสัมผัส MFR ขณะที่

การสัมผัส MFR กำลังเข้ม 500 mW/cm² พบความเข้มข้นของสารสื่อประสาททั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้นในวันที่ 5 แต่ลดลงอย่างต่อเนื่องหลังการสัมผัส การศึกษาการสัมผัส MFR อย่างเฉียบพลันความถี่กำลังเข้ม 25 mW/cm² ทำให้ acetylcholine esterase (AChE) ลดลง ขณะที่การสัมผัสกำลังเข้ม 3.5 mW/cm² โดยสัมผัสซ้ำ ๆ พบ AChE เพิ่มขึ้น

ขณะที่การศึกษาของ Dutta และคณะ พบว่า AChE เพิ่มขึ้นในกำลังเข้ม ที่ SAR 0.05 และ 0.02 W/kg แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ SAR 0.005 0.01 หรือ 0.1 W/kg ซึ่งสรุปว่าเป็นค่าการสัมผัสที่มีผลกระทบ (window effect หมายถึง ค่าการสัมผัสที่ทำให้เกิดผลกระทบทางชีวภาพที่สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสัมผัสที่น้อยกว่าหรือมากกว่า เช่น ค่าความเข้มค่าความถี่เฉพาะค่านั้น) นอกจากนี้พบการศึกษา²⁵ เปลี่ยนแปลงหน้าที่สารสื่อประสาทหลังการสัมผัส MFR ที่ระดับความเข้มต่ำและพบผลการศึกษาที่น่าสนใจคือ เมื่อให้ opiate-antagonists ก่อนการสัมผัส MFR จะพบว่ามีการสกัดกันผลกระทบ MFR ซึ่งชี้ว่า MFR มีปฏิสัมพันธ์กับ endogenous opioids ในสมอง ซึ่งเป็นสารสื่อประสาทที่คล้ายฝิ่นและมีหน้าที่สำคัญในการแสดงทางพฤติกรรม นอกจากนี้พบว่า การตอบสนองของการสัมผัส MFR ของสมองแตกต่างกันตามบริเวณของสมองซึ่งมีความไวต่างกัน และขึ้นกับการรับสัมผัสแบบเฉียบพลันหรือเรื้อรังสัมผัสซ้ำ ๆ ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการสัมผัส โดยจะรบกวนการหลังสารสื่อประสาทและตัวรับสารสื่อประสาท^{17,18,23}

6. ผลกระทบต่อโครงสร้างระดับเซลล์ของสมอง การสัมผัส MFR จะกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบประสาทส่วนกลาง โดยมักพบจากการสัมผัสพลังงานที่มีความเข้มสูงและสัมผัสเวลานาน ซึ่งมีการรายงานภาวะบวมและบาดเจ็บจากความร้อนและทำให้เซลล์ตาย นอกจากนี้พบอีกว่าการสัมผัสซ้ำ ๆ ที่ระดับความเข้มต่ำทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างระดับเซลล์ในประสาทส่วนกลางเช่นกัน การศึกษาของ Gordon และ Tolgskaya พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นประสาทในสมองหนูหลังการสัมผัส MFR ที่กำลังความเข้มน้อยกว่า 10 mW/cm²

ขณะที่การสัมผัส MFR กำลังความเข้ม 25 mW/cm² โดยสัมผัสซ้ำ ๆ ทำให้เกิดการเสื่อมของ myelin และการเพิ่มขึ้นของเซลล์ค้ำจุน (Glial cells) รวมทั้งพบการทำลายเยื่อบุกระจกตา corneal endothelium พบการเสื่อมของม่านตาและจอตาทำให้การมองเห็นเสื่อมลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเซลล์ โดยเฉพาะการเกิดเซลล์ตาย (apoptosis) และการเหนี่ยวนำให้เกิดการเพิ่มของเซลล์อย่างรวดเร็วเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง²³⁻²⁵

7. ผลกระทบต่อคลื่นไฟฟ้าสมอง (electroencephalography; EEG) คลื่นไฟฟ้าสมองเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากผลรวมของกระแสไฟฟ้าของกลุ่มเซลล์ประสาทในสมองที่เรียกว่า นิวรอน (neuron) ซึ่งติดต่อกันด้วยวิธีการขนส่งอนุภาคไฟฟ้าผ่านเยื่อเซลล์ เมื่อเซลล์ประสาทได้รับการกระตุ้นจากสารสื่อประสาท (neurotransmitter) เซลล์ประสาทจะปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าไปตามใยประสาท (nerve fiber) ซึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่แสดงเป็นคลื่นสมองหรือคลื่นไฟฟ้าสมอง การสัมผัส MFR ของเนื้อเยื่อประสาทเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) การศึกษาจำนวนมาก การศึกษาการสัมผัส MFR ที่มีผลต่อคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) โดยการศึกษาที่มีการสัมผัสอย่างเฉียบพลันในระดับความเข้ม 20 mW/cm² ทำให้รูปแบบคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) เปลี่ยนไป ขณะที่การศึกษาการสัมผัสแบบเรื้อรังจะพบคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) มีการเดินไม่เป็นจังหวะ (desynchronization) โดยพบว่าการเดินไม่เป็นจังหวะของคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) สัมพันธ์กับระดับกำลังความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะที่ Servantie และคณะศึกษาหนูทดลองที่สัมผัส MFR กำลังเข้ม 5 mW/cm² แบบเรื้อรัง โดยพบคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) สมองใหญ่บริเวณ occipital cortex มีความถี่สอดคล้องกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และพบว่าความถี่ที่สอดคล้องกันจะหายไปหลังสิ้นสุดการสัมผัส 2-3 ชั่วโมง ซึ่งสรุปว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเหนี่ยวนำให้คลื่นสมองมีความถี่เดียวกัน ขณะที่ Bawin และคณะ พบการเปลี่ยนรูปแบบคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) จากการสัมผัส MFR ที่ความถี่ 8 และ 16 Hz ที่ความเข้ม 1 mW/cm² โดยไม่พบการเปลี่ยนแปลง

ที่ความถี่ที่ต่ำหรือสูงกว่าที่กำหนด โดยสรุปว่าความถี่ 8 และ 16 Hz เป็นความถี่ที่ทำให้เกิดผลกระทบ (window effect) นอกจากนี้การศึกษาการสัมผัสแบบเรื้อรังที่กำลังเข้ม 0.01 - 0.5 mW/cm² พบคลื่น alpha เพิ่มขึ้น และพบคลื่น delta มีความกว้างของคลื่นเพิ่มขึ้นหลังการสัมผัส 2 สัปดาห์ซึ่งเป็นผลจากการก่อกวนการเคลื่อนไหวของคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) รวมทั้งพบ slow wave เพิ่มขึ้นหลังการสัมผัสในเวลานาน ซึ่งเป็นคลื่นสมองที่นำไปสู่ระยะสิ้นสุดการนอน การศึกษายังพบอีกว่าการสัมผัส MFR ความถี่ 15 หรือ 60 Hz แบบเรื้อรัง พบคลื่นมี Spindles สูงขึ้นและเปลี่ยนเป็นความถี่ต่ำลง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) ในระยะ non-REM sleep และพบการเหนี่ยวนำระยะ REM sleep ให้มีระยะสั้นขึ้น รวมทั้งทำให้ตื่นหลังการนอนหลับมีจำนวนครั้งเพิ่มขึ้น ซึ่งผลกระทบดังกล่าวเกิดขึ้นแตกต่างกันตามระบบของโทรศัพท์มือถือ เช่น ระบบ 2G และ 3G แต่ก็ยังมีการศึกษาที่ขัดแย้งกันอยู่ นอกจากนี้การศึกษาที่สำคัญพบว่า MFR ทำปฏิกิริยากับ epileptic foci ในผู้ป่วยโรคลมชัก โดยคลื่นความถี่ที่ตรงกันกับคลื่นสมองจะกระตุ้นให้ผู้ป่วยโรคลมชักเกิดอาการชักได้ อย่างไรก็ตามยังพบหลายการศึกษาที่ไม่มีความสัมพันธ์^{12,16,23,26}

■ สรุป

โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นแหล่งแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (microwave frequency radiation: MFR) ที่มีการใช้ใกล้กับศีรษะมากที่สุดแม้ว่าการแพร่ของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจะต่ำกว่าค่ามาตรฐานสูงสุดที่กำหนด สิ่งที่น่าสนใจพบว่ามีสมองใช้ระบบควบคุมการทำงานของร่างกายด้วยระบบคล้ายไฟฟ้า มีภาวะไม่เสถียร¹⁴⁻¹⁶ การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าอาจทำให้เกิดผลกระทบที่ไม่ใช่ความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาชีวเคมี โครงสร้างเซลล์เมตาโบลิซึม (metabolism) มีผลต่อหน้าที่ทางระบบประสาทแบบชั่วคราวและแสดงผลการเปลี่ยนแปลงทางพฤติกรรม เช่น สูญเสียความจำ การเสียสมาธิ และนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุได้ง่าย โดยการแพทย์ในกลุ่มประเทศสหภาพโซเวียตและโปแลนด์ ได้กำหนดกลุ่มอาการที่เกิดจากการสัมผัสไมโครเวฟ เรียกว่า กลุ่มอาการป่วยจาก

ไมโครเวฟ (microwave sickness syndrome) ซึ่งประกอบด้วย อาการอ่อนแรง อาการทางผิวหนังผื่น รอยแดง ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ ความดันโลหิตเปลี่ยนแปลง เบื่ออาหาร ไร้สมรรถภาพทางเพศและความจำเสื่อม และได้รับการพิสูจน์ว่ามีความเกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญกับกำลังความเข้มของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า^{16,27-30}

ข้อมูลการศึกษาส่วนใหญ่ พบว่า ปฏิกิริยาทางระบบประสาทมีการตอบสนองที่ไม่ใช่เส้นตรงที่คาดว่า จะเป็นตามความเข้มของ MFR แต่ต้องพิจารณาลักษณะของคลื่น เช่น ระบบของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ลักษณะคลื่น ความยาว ความถี่ กำลังความเข้ม และการสัมผัส เช่น การสัมผัสแบบเฉียบพลัน แบบเรื้อรัง ระยะเวลาและความถี่ในการสัมผัส ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการตอบสนองทางชีวภาพ และการหาความสัมพันธ์ของปริมาณการสัมผัส และผลการตอบสนอง

มีหลายการศึกษาอธิบายว่าผลกระทบชีวภาพเกิดจาก MFR ที่ความถี่และกำลังเฉพาะ (Window effects) นอกจากนี้งานวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าระบบประสาทสามารถปรับให้กลับสู่สมดุลเมื่อได้รับการสัมผัส MFR แต่การสัมผัสซ้ำ ๆ จะทำให้เกิดภาวะเครียดจนทำให้กระบวนการสู่สมดุลล้มเหลว การศึกษากระบวนการจากการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดผลกระทบสุขภาพยังไม่สามารถสรุปโดยปราศจากข้อสงสัย (inconclusive) ขณะที่การใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่มีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเทคโนโลยีที่มีคุณประโยชน์มหาศาลแต่ถ้าใช้ไม่เหมาะสมก็ทำให้เทคโนโลยี เป็นเหมือนขยะและทำลายชีวิต² องค์การอนามัยโลก ได้กล่าวไว้ว่า ปัจจุบันยังมีช่องว่างทางความรู้ (knowledge gap) ด้านผลกระทบทางชีวภาพของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ยังไม่ชัดเจน จึงต้องมีมาตรการเชิงป้องกันต่าง ๆ เช่น การให้ข้อมูลความรู้ที่ทันสมัยต่อสาธารณะ การใช้หูฟัง (hand free) การปรับลดมาตรฐานความเข้มให้ต่ำลง จนถึงการร่างกฎหมายห้ามการส่งเสริมการขายโทรศัพท์เคลื่อนที่แก่เด็ก โดยเป็นไปตามหลักการป้องกันไว้ก่อน (precautionary protection) และเกิดแนวทางการใช้เทคโนโลยีอย่างปลอดภัย

1. Odom JD. A study of the impact of mobile phones as learning tools for youth in southern baptist churches. Dissertation of Doctoral Degree in Church and Family Ministry, Southwestern Baptist Theological Seminary. 2012.
2. Tangtermwong C. A current trend of a social network on mobile phones. Soc Sei Lib Art 2013;2(1)28-42; [cited 2014 March 25]. Available from: www.re.kps.ku.ac.th/ejournal/index.php/component/k2/item/download/107.html.
3. Canalys. Mobile device market to reach 2.6 billion units by 2016; Press released 2013 [cited 2015 June 25]. Available from: www.canalys.com.
4. National science and technology development agency. Thailand ICT market 2010 and outlook 2011. 2010; [cited 2014 August 22]. Available from: http://www.uh.co.th/download/thailCT_outlook.pdf.
5. The United Nations environment programme. The fifth global environment outlook environment for the future we want (GEO-5). First published by the United Nations environment programme.2012; [cited 2014 January 22]. Available from: http://www.unep.org/geo/pdfs/GEO5_SPM_English.pdf.
6. Robert F, Cleveland J, Jerry LU. Questions and answers about biological effects and potential hazards of radiofrequency electromagnetic fields.OET BULLETIN 56 Fourth Edition. Federal Communications Commission. 1999.
7. Phiasai T. Cellular network. Lecture document of wireless communication and network. Sukhothai Thammathirat open University; [cited: 2015 July 6]. Available from: <http://www.stou.ac.th/website/subbj/fileUpload/99313-9-1.pdf>.
8. Gogineni S. Computational study of electromagnetic wave effect induced by mobile phones on brain tissue and its biological implications. Thesis for Master of Science in Mechanical Engineering. University of Texas at San Antonio. 2010.
9. Kelsh MA, Shum M, Sheppard AR et al. Measured radiofrequency exposure during various mobile phone use scenarios. JESEE 2011;21(4):343-54.
10. Karger CP. Mobile phones and health: A literature overview. Z Med Phys 2005;15:73-85.
11. Hakim BM. Precise SAR measurements in the near-field of RF antenna systems. Dissertation for Doctor of Philosophy, Faculty of the Graduate School, the University of Maryland. 2006.
12. Hyland GJ. Physics and biology of mobile telephony. Lancet 2000;356:1833-6.
13. Wessapan T , Srisawatdhisukul S, Rattanadecho P. Specific absorption rate and temperature distributions in human head subjected to mobile phone radiation at different frequencies. Interl J Heat Mass Transfer 2012;55:347-59.
14. Lu Y, Huan Y. Biological effects of mobile phone radiation. 2012 International Conference; May; 5-8; Shenzhen. IEEE 2012;2:1-5.
15. Madhuri S. Cell phone exposures and headaches, hearing loss, and behavioral problems in children. Dissertation for Doctor of Philosophy in Epidemiology, University of California. 2012.

16. Shckorbatov Y. The main approaches of studying the mechanisms of action of artificial electromagnetic fields on cell. *J Electr Electron Syst* 2014; 3(2). doi:10.4172/23320796.1000123.
17. Kevin SS. Quantitative electroencephalographic profiles of individuals exposed to weak-intensity physiologically patterned electromagnetic fields. Thesis for Master of Arts in Experimental Psychology, Laurentian University Sudbury, Ontario. 2011.
18. Liburdy RP, Vanek PF Jr. Microwaves and the cell membrane. Temperature, plasma, and oxygen mediate microwave-induced membrane permeability in the erythrocyte. *RRS* 1985;102(2):190-205.
19. Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Evaluation of specific absorption rate as a dosimetric quantity for electromagnetic fields bioeffects. *PLOS ONE* 2013 ;8(6). doi:10.1371/journal.pone.0062663.
19. Zhao R, Zhang S, Xu Z et al. Studying gene expression profile of rat neuron exposed to 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields with cDNA microassay. *Toxicology* 2007;235:167–75.
20. Allan HF. Headaches from cellular telephones: Are they real and what are the implications. *EHP J* 1998;106(3):101-3.
21. Okonigene RE. Siting of GSM base station antenna and its health consequences. Seventh international conference on information technology. 2010:613-8.
22. Lai H. Neurological effects of radiofrequency electromagnetic radiation relating to wireless communication technology 1997; [cited: 2014 August 8]. Available from: www.mapcruzin.com.
23. Brillaud E. et al. Effect of an acute 900 MHz GSM exposure on glia in the rat brain: A time dependent study. *Toxicology* 2007;238:23–33.
24. Ammari M, Lecomte A, Sakly M et al. Exposure to GSM 900MHz electromagnetic fields affects cerebral cytochrome c oxidase activity. *Toxicology* 2008;250:70-4.
25. Lai H. Neurological effects of non-ionizing electromagnetic fields. Prepared for the BioInitiative working group, USA. 2014; [cited: 2014 August 8]. Available from: http://www.bioinitiative.org/report/wp-content/uploads/pdfs/sec09_2012_Evidence_%20Effects_%20%20Neurology_behavior.pdf,
26. Khan MM. Adverse effects of excessive mobile phone use. *IJOMEH* 2008;21(4):289-93.
27. Kumar P, Dongre K, Ghai G. Prevalence of Subjective Symptoms in Mobile Users Aged More than 18 Years in Nagpur. *IJPOT* 2013;7(2):260- 4.
28. Nathan N, Zeitzer J. A Survey study of the association between mobile phone use and daytime sleepiness in California high school students. *BMC Public Health* 2013;13(840). doi:10.1186/1471-2458-13-840.
29. Szjlkowska A, Gadzicka E, Szymczak W et al. The risk of subjective symptoms in mobile phone users in Poland an epidemiological study. *IJOMEH* 2014;27(2):293–303.

