

# Simulation of the Radiation of Dual-Band Handheld Mobile Phone in Vicinity of Anatomical Model of Human Head and Calculation of the 1gr-Avearaged SAR Distribution

Hamid Khodabakhshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Communication, Faculty of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam khomeini Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

## Abstract

**Introduction:** In recent years, the rapidly increasing use of mobile phone operating nearby the human head has caused public concern for its effects on human health. The FDTD methodology is widely used for calculation of the effects of electromagnetic fields on human body.

**Methods and Materials:** In this paper, first a dual band patch antenna structure (GSM-900 and DCS 1800), which is located in a plastic box, has been designed and simulated using FDTD method. Then, we use an anatomical model of human head with 21 kinds of tissues contains a set of MRI images of a healthy 35-years-old man. To simulate the effects of radiation of handheld phone on human head using FDTD, we insert the simulated model of mobile phone in vicinity of the anatomical model of human head. The output power of antenna is set in 600 and 250 mW at 900 and 1800 MHz, respectively.

**Results:** Dual-band patch antenna has been simulated in touch position with the human head model using FDTD and the electric field distributions have been obtained in different slices of the head model. Using the obtained results, local SAR and 1-gr averaged SAR distribution have been calculated. It is seen that the peak of 1-gr averaged SAR is obtained as 1.795 and 0.4683 W/kg at 900 and 1800 MHz, respectively. The calculated values of SAR are less than the allowable value of SAR (2 W/kg).

**Discussion and Conclusion:** It is observed that the electric field is mostly concentrated on the ear and brain tissues at 900 MHz while the peak of electric field occurs in the skin region at 1800 MHz. The peak of local SAR occurs in the central region of ear tissue in direct touch of upper side of handheld mobile phone at 900 and 1800 MHz. To validate the proposed method, the mobile phone in the proximity of the spherical head phantom has been simulated and the results have been compared with the results of XFDTD and CST software.

**Keywords:** Anatomical head model, Dual band patch antenna, Finite difference time domain, Specific absorption rate

\*(Corresponding author) Hamid Khodabakhshi, Department of Communication, Faculty of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam khomeini Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran E mail: khodabakhshi.hamid@gmail.com

## شبیه‌سازی تشعشع گوشی تلفن همراه دو بانندی در مجاورت مدل آناتومیک سر انسان و محاسبه توزیع SAR متوسط یک گرم

حمید خدابخشی<sup>\*۱</sup>

۱ گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### چکیده

مقدمه: در سال‌های اخیر با رشد سریع سیستم‌های مخابرات سیار، نگرانی‌ها نسبت به اثرات زیستی تابش RF گوشی‌های تلفن به شدت افزایش یافته است. معمولترین روش برای محاسبه اثرات امواج الکترومغناطیسی روی بافت‌های بدن، روش تفاضل محدود حوزه زمان FDTD می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مقاله، ابتدا یک ساختار آنتن پچ دو بانندی GSM-900 و DCS 1800 که داخل یک پوشش پلاستیکی مناسب به عنوان جعبه گوشی قرار دارد را با روش FDTD طراحی و شبیه‌سازی شده است. سپس از مدل آناتومیک سر انسان با ۲۱ نوع بافت مختلف که شامل یک مجموعه از تصاویر MRI از یک مرد سالم ۳۵ ساله می‌باشد، استفاده شده است. جهت شبیه‌سازی اثر تشعشع آنتن گوشی روی سر با روش FDTD، مدل آناتومیک سر انسان و مدل شبیه‌سازی شده برای گوشی تلفن را در کنار هم قرار می‌دهیم. توان خروجی آنتن در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب ۶۰۰ و ۲۵۰ میلی وات تنظیم می‌شود.

نتایج: آنتن پچ دو بانندی در وضعیت تماس با مدل آناتومیک سر، با روش FDTD شبیه‌سازی شده و توزیع میدان الکتریکی در برش‌های مختلف سر نمایش داده شده است. با استفاده از نتایج حاصل، توزیع SAR محلی و SAR متوسط یک گرم محاسبه گردید. با مشاهده توزیع SAR متوسط یک گرم مشخص گردید که پیک SAR متوسط یک گرم در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب ۱/۷۹۵ و ۰/۴۶۸۳ وات بر کیلوگرم بوده که از مقدار مجاز و استاندارد ۲ وات بر کیلوگرم کمتر می‌باشد. بحث و نتیجه‌گیری: مشاهده گردید، در فرکانس ۹۰۰ MHz میدان الکتریکی، عمدتاً در بافت گوش و مغز متمرکز بوده، در حالیکه پیک میدان و تمرکز آن، در فرکانس ۱۸۰۰ MHz در ناحیه پوست رخ می‌دهد. محل وقوع پیک SAR محلی در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز در بافت غضروفی گوش در ناحیه مرکزی گوش که در تماس مستقیم با قسمت فوقانی گوشی می‌باشد. جهت راست آزمایی، آنتن مذکور در مجاورت فانتوم کروی سر شبیه‌سازی شده و نتایج با نرم افزار تمام موج XFDTD و CST مقایسه گردید.

کلید واژه‌ها: آنتن پچ دو بانندی، روش تفاضل محدود حوزه زمان، مدل آناتومیک سر، نرخ ویژه جذب.

### مقدمه

ایجاد نموده است. مساله بر همکنش بین گوشی موبایل و کاربر از دید افراد مختلف شامل عموم مردم، سازمان‌های مسئول حفاظت در برابر تشعشعات، صنایع تولید کننده تجهیزات مخابرات سیار

در سالیان اخیر، استفاده رو به رشد از تلفن همراه در مجاورت سر، نگرانی‌های زیادی در ارتباط با اثرات زیستی امواج الکترومغناطیسی

\* (نویسنده مسئول) حمید خدابخشی، گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، بزرگراه خلیج فارس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام (ره)، تهران، ایران.  
شماره تماس: ۰۲۱-۵۵۲۲۹۲۰۰ | آدرس الکترونیک: khodabakhshi.hamid@gmail.com

تلفن همراه بر سر انسان را با استفاده از روش FDTD برای انواع مختلف آنتن‌ها شامل آنتن تک قطبی، آنتن‌های PIFA نصب شده در کنارهای جعبه گوشی و PIFA نصب شده در پشت جعبه گوشی بررسی نموده است. در این تحقیقات از مدل آناتومیک سر انسان استفاده شده است. در این مدل آناتومیک سر شش نوع بافت شامل استخوان، پوست، چربی، ماهیچه، مغز و عدسی چشم در نظر گرفته شده است. در این مقالات فرکانس کار ۹۰۰ MHz و توان تحویلی به آنتن ۱ W در نظر گرفته شده است. مقدار حداکثر SAR متوسط یک گرم برای آنتن‌های تک قطبی، PIFA در کنارهای جعبه و PIFA در پشت جعبه به ترتیب ۲/۰۶ و ۲/۰۷ و ۰/۹ وات بر کیلوگرم حاصل شده است. در مقاله (۶) افزایش دمای بافت‌ها و توزیع SAR در مدل آناتومیک سر در فرکانس‌های ۹۰۰ MHz و ۱/۵ GHz توسط روش FDTD محاسبه شده است. در این تحقیق، تلفن همراه به صورت یک آنتن مونوپل ربع موج که روی یک جعبه فلزی با پوشش عایقی نصب شده مدل سازی شده است. شش نوع بافت شامل استخوان، مغز، ماهیچه، کره چشم، چربی و پوست در این مدل حضور دارند. توان خروجی آنتن در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز ۰/۶ W و در فرکانس ۱/۵ GHz، ۰/۲۷ W در نظر گرفته شده است. پس از محاسبه توزیع SAR در مدل سر از معادله زیست حرارتی جهت محاسبه افزایش دمای بافت‌ها استفاده شده است. مقدار پیک SAR متوسط یک گرم در کل سر در فرکانس‌های ۹۰۰ MHz و ۱/۵ GHz به ترتیب برابر ۲/۱۷ و ۱/۸۸ وات بر کیلوگرم حاصل شده است. حداکثر افزایش دما در مغز در فرکانس‌های ۹۰۰ MHz و ۱/۵ GHz به ترتیب برابر ۰/۰۹ °C و ۰/۰۷ °C بوده است.

برناردی در (۷) نیز توزیع SAR و افزایش دما در بافت‌های سر برای مدل‌های مختلف گوشی تلفن در فرکانس ۹۰۰ MHz را بدست آورده است. در این مقاله از مدل تصحیح شده آناتومیک سر با رزولوشن ۲×۲×۲ mm استفاده شده است. شانزده بافت مختلف در این مدل سر تشخیص داده شده است. از مدل‌های تلفن سلولی شامل آنتن دو قطبی نیم موج، آنتن تک قطبی ربع موج در روی یک جعبه هادی و آنتن PIFA در کنارهای جعبه هادی استفاده شده است. توان خروجی آنتن در همه مدل‌ها برابر ۶۰۰ mW در نظر گرفته شده است. مقادیر پیک SAR متوسط یک گرم برای آنتن‌های تک قطبی، دو قطبی و PIFA به ترتیب مقادیر ۲/۱۷، ۲/۷۴ و ۳/۷۲ وات

و محققان دارای اهمیت می‌باشد. مطالعات علمی فراوانی درباره اثرات تشعشعات تجهیزات مخابرات سلولی روی سلامتی انسان صورت گرفته است. مساله اثرات امواج گوشی موبایل روی سر انسان یک موضوع میان رشته‌ای بوده و مطالعه دقیق آن نیاز به چندین تخصص در زمینه‌های اپیدمیولوژی، فیزیولوژی، بیوفیزیک و بیوالکترومغناطیس دارد.

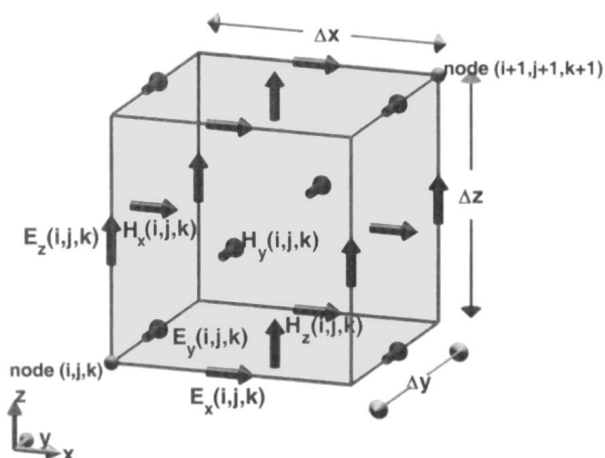
برای ارزیابی تاثیر تشعشع امواج الکترومغناطیسی روی بافت زنده، پارامتر SAR (نرخ ویژه جذب) بصورت میزان جذب انرژی الکترومغناطیسی در واحد جرم تعریف می‌شود:

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

که در آن  $\sigma (S/m)$ ،  $E (V/m)$ ،  $\rho (kg/m^3)$  به ترتیب چگالی جرمی، مقدار موثر دامنه میدان الکتریکی و رسانایی می‌باشد. لذا، پارامتر SAR در نقطه اندازه‌گیری با استفاده از توزیع میدان الکتریکی داخلی، حاصل می‌شود.

معمولترین روش برای محاسبه اثرات امواج الکترومغناطیسی روی بافت‌های بدن، روش تفاضل محدود حوزه FDTD می‌باشد، علت آن انعطاف پذیری این روش در مدل سازی آنتن‌هایی با ساختار هندسی پیچیده و بافت‌های زنده مجاور آن است. در این روش از مدل‌های واقعی سر مانند مدل آناتومیک سر بر مبنای تصاویر MRI استفاده می‌شود. تحقیقات اولیه درباره کاربرد روش FDTD در بیوالکترومغناطیس توسط تافلاو در سال ۱۹۷۵ میلادی صورت گرفت (۱). در این مقاله، میدان‌های الکترومغناطیسی القاء شده و افزایش دما در یک مدل از چشم انسان که در معرض تشعشعات مایکروویو قرار داشت محاسبه گردید. در سال ۱۹۸۸، سولیوان اولین مدل سه بعدی FDTD برای مسأله جذب امواج الکترومغناطیس توسط کل بدن انسان معرفی نمود (۲). در مقاله (۳) روش FDTD جهت محاسبه جریان‌ها و SAR القاء شده در سر انسان ناشی از میدان الکترومغناطیسی تشعشع یافته از یک تلفن سلولی در فرکانس ۸۳۵ مگاهرتز با توان خروجی ۰/۶ وات استفاده گردید. سر انسان به صورت یک ساختار مکعبی مدل سازی شده و فقط شش نوع بافت شامل ماهیچه، استخوان، خون، مغز، پوست و چشم در نظر گرفته شد.

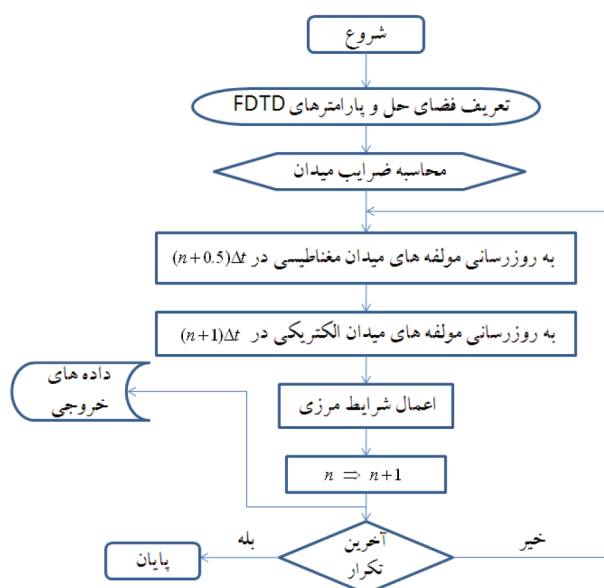
رحمت سمیعی در مقالات (۴) و (۵)، مسأله اثرات الکترومغناطیسی



شکل ۱- آرایش مولفه های میدان در سلول Yee

برای بازه زمانی  $\Delta t$ ، مولفه های میدان الکتریکی در لحظات زمانی  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, n\Delta t$  نمونه برداری شده، در حالیکه مولفه های میدان مغناطیسی در لحظات  $\frac{1}{2}\Delta t, (1+\frac{1}{2})\Delta t, \dots, (n+\frac{1}{2})\Delta t$  نمونه برداری می شوند.

با استخراج معادلات روزآمد FDTD، مطابق شکل (۲) یک نمودار گردشی جهت محاسبه میدان ها حاصل می شود. گام نخست در این الگوریتم، تعریف فضای حل مساله شامل اجسام، انواع مواد، منابع و تعریف پارامترهای مساله می باشد. سپس ضرائب ثابت در معادلات روزآمد محاسبه شده و بصورت آرایه ذخیره می شوند. مولفه های میدان بصورت آرایه هایی با مقدار اولیه صفر تعریف می شوند. با



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم FDTD (۸)

بر کیلوگرم بدست آمد. لذا حداکثر پیک SAR متوسط یک گرم در مدل گوشی با آنتن PIFA حاصل شده است. ضمناً پیک SAR متوسط یک گرم در مغز برابر ۱/۸۵ وات بر کیلوگرم بوده و توسط آنتن دو قطبی نیم موج ایجاد شده است. حداکثر پیک افزایش دما در کل سر توسط آنتن PIFA ایجاد شده و برابر  $0.43^\circ\text{C}$  می باشد. اما حداکثر پیک افزایش دما در مغز توسط آنتن دو قطبی نیم موج ایجاد شده و برابر  $0.19^\circ\text{C}$  می باشد.

در این مقاله، ابتدا الگوریتم FDTD به اختصار شرح داده می شود. سپس آنتن یچ دو بانده همراه با جعبه توسط روش FDTD شبیه سازی شده و پارامترهای آنتن مانند الگوی تابشی و تلف برگشتی آنتن، تعیین می شود. سپس مدل آناتومیک سر ارائه شده و آنتن یچ دو بانده در وضعیت تماس با مدل آناتومیک سر، با روش FDTD شبیه سازی شده و توزیع میدان الکتریکی، توزیع SAR محلی و SAR متوسط یک گرم در برش های مختلف سر نمایش داده می شود. در پایان، جهت راست آزمایی روش ارائه شده، آنتن مذکور در مجاورت فانتوم کروی سر شبیه سازی شده و نتایج با نرم افزار تمام موج XFDTD و CST مقایسه می گردد.

## مواد و روش ها

**الف) الگوریتم تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD):** نقطه شروع الگوریتم FDTD، معادلات کرل ماکسول در حوزه زمان می باشد:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2)$$

الگوریتم FDTD، معادلات دیفرانسیل جزئی رابطه (۲) را با تقریب مشتقات مکانی و زمانی با روابط تفاضل محدود مرکزی مرتبه دوم (۸) در هر دو حوزه زمان و مکان به صورت گسسته در می آورد. معادلات گسسته حاصل، مقادیر میدان ها در گام های زمانی آینده بر حسب مقادیر گذشته میدان ها محاسبه می کند. یک شبکه FDTD شامل  $N_x \times N_y \times N_z$  سلول رادر نظر بگیرد. یک سلول این شبکه، یک سلول Yee نامیده می شود. موقعیت مکانی مولفه های میدان در سلول Yee آرایش ویژه ای دارند (شکل (۱)). مولفه های میدان الکتریکی در مراکز لبه های سلول Yee قرار داشته و در جهت موازی با لبه های مذکور می باشند. مولفه های میدان مغناطیسی در مراکز وجه های سلول Yee واقع بوده و بر این سطوح عمود می باشند (۸).

$$\Delta t \leq 1 / c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}} \quad (۳)$$

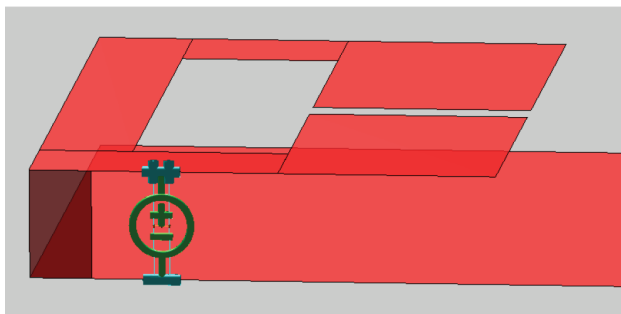
که در آن  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  و  $\Delta z$  کوچکترین ابعاد سلول موجود در شبکه FDTD و  $c$  سرعت نور در فضای آزاد می باشد.

ب) شبیه سازی آنتن دو باندهی موبایل: در این فصل یک ساختار آنتن پیچ دو باندهی مطابق شکل (۳) در نظر گرفته می شود (۱۰). این ساختار دارای دو مسیر تشدید ربع موج می باشد. مسیر کوتاه تر برای باند DCS (۱۷۱۰-۱۸۸۰ MHz) و مسیر طولانی تر برای باند GSM (۸۹۰-۹۶۰ MHz) بوده و فاصله بین دو صفحه فلزی ۸ mm می باشد. یک نوار فلزی باریک در لبه پیچ جهت ایجاد اتصال کوتاه بین صفحه پیچ و صفحه زمین استفاده گردیده است. ابعاد صفحه پیچ ۳۶×۲۸ mm و ابعاد صفحه زمین ۱۰۰×۴۰ mm در نظر گرفته شده اند. اکنون یک پوشش پلاستیکی مناسب به عنوان جعبه گوسی در نظر گرفته می شود (شکل (۳)). جعبه گوسی به صورت یک مکعب مستطیل از جنس پلاستیک ساخته شده است. جعبه تلفن دارای ابعاد خارجی ۱۱۰×۵۰×۲۰ mm بوده و همه دیواره های جعبه دارای ضخامت دو میلیمتر می باشند. این جعبه مدل ساده شده یک تلفن سلولی با لبه های مستقیم می باشد. مشخصات ماده سازنده این پوشش،  $\rho = 1000 [kg/m^3]$ ،  $\sigma = 0$ ،  $\epsilon_r = 2.9$  می باشد.

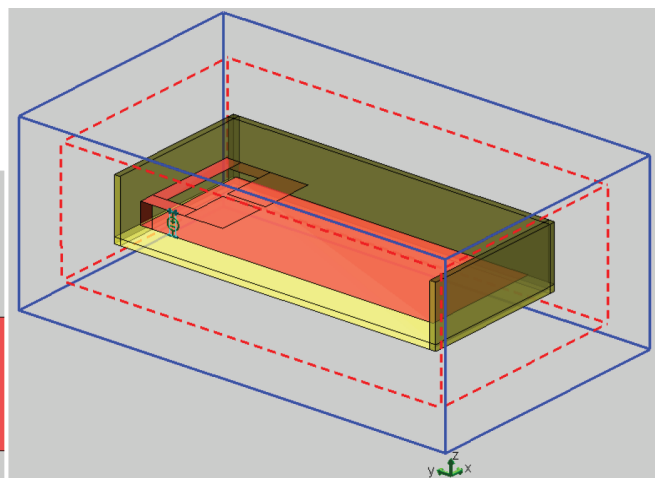
اکنون ساختار آنتن مذکور با پوشش پلاستیکی و بدون جعبه را با روش FDTD شبیه سازی می نمایم. فضای حل FDTD شامل سلول هایی با ابعاد  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1 mm$  می باشد. فضای حل

شروع فرآیند تکرار، میدان ها در فضای حل در اثر حضور منابع، ایجاد می شوند. در هر گام زمانی فرآیند تکرار، ابتدا مولفه های میدان مغناطیسی در لحظات  $(n + \frac{1}{2})\Delta t$  روزآمد می شوند. سپس مولفه های میدان الکتریکی در لحظات  $(n + 1)\Delta t$  روزآمد می شوند. فضای مساله ابعاد محدودی دارد، لذا شرایط مرزی مناسب روی مرزهای فضای حل مساله اعمال می شود. بنابراین، مولفه های میدان روی مرزهای ناحیه حل مساله در هر تکرار با توجه به نوع شرایط مرزی روزآمد می شوند. مقادیر فعلی مولفه های میدان مورد نظر می تواند به عنوان داده های خروجی نگهداری و ذخیره شده و برای پردازش نهایی جهت محاسبه پارامترهای مطلوب دیگر استفاده نمود. فرآیند تکرار FDTD تا آخرین تکرار که توسط کاربر مشخص می گردد، ادامه می یابد.

برای اطمینان از یک جواب پایدار و همگرا ضرورت دارد ابعاد سلول های شبکه FDTD و گام زمانی درست انتخاب شوند. انتخاب سلول های بسیار کوچک باعث افزایش غیر ضروری زمان محاسبات شده و اکثر حالات منجر به افزایش دقت نمی شود. معمولاً ابعاد سلول کوچکتر از یک دهم طول موج در نظر گرفته می شود (۹). برای مواد توپر و نفوذپذیر مانند بافت های بیولوژیک، ابعاد سلول ها به دلیل کاهش طول موج در داخل این مواد کوچکتر انتخاب می شوند. بعد از انتخاب ابعاد سلول گام بعدی تعیین یک گام زمانی مناسب  $\Delta t$  می باشد. جهت دستیابی به جواب پایدار گام زمانی توسط شرط کورانت - فردیش - لوی (CFL) به صورت زیر تعیین می شود (۹):

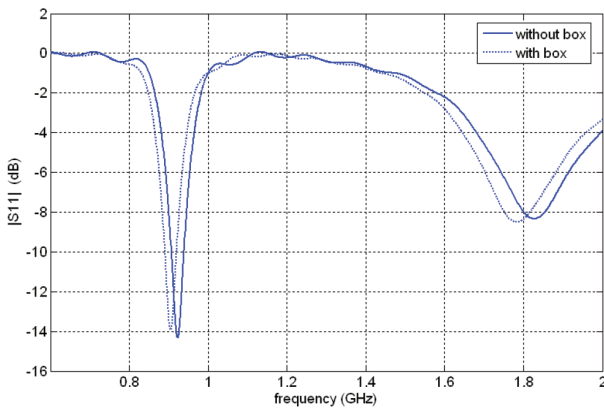


(ب)



(الف)

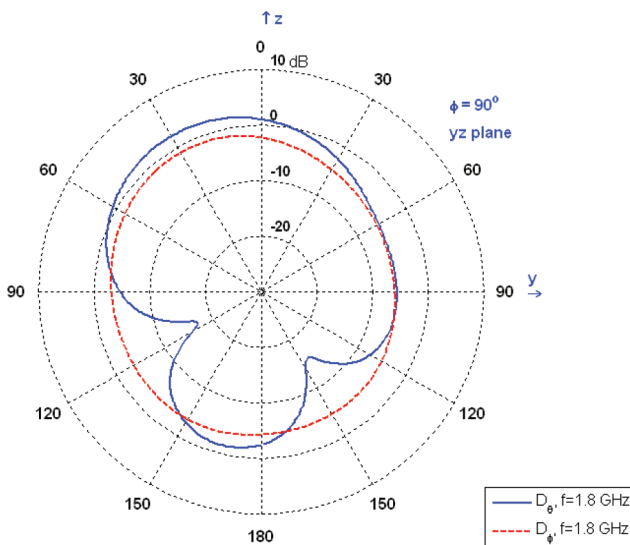
شکل ۳- (الف) فضای حل FDTD آنتن پیچ دوباندهی همراه جعبه، (ب) تعریف ولتاژ و جریان در پورت ورودی آنتن.



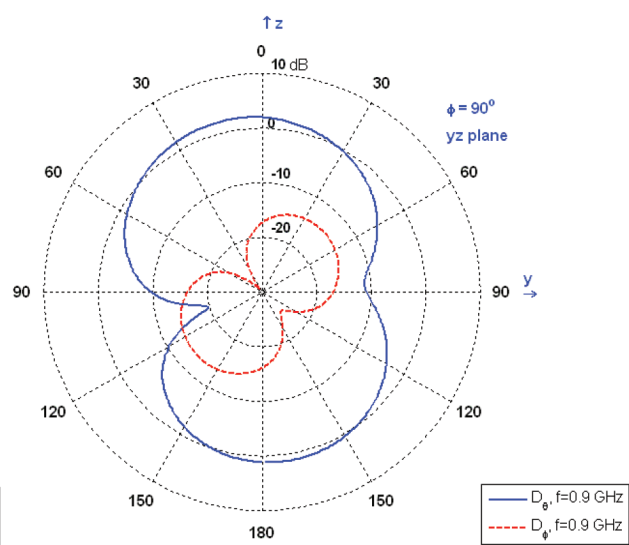
شکل ۴- تلف برگشتی آنتن پیچ دوباندی با جعبه و بدون جعبه

شکل‌های (۵) و (۶) الگوی تابشی آنتن پیچ با پوشش پلاستیکی در صفحات  $yz$  و  $xz$  در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان می‌دهد. تقارن پترن توان  $D_\phi$  در صفحه  $xz$  مشاهده می‌شود. به دلیل پترن همه جهته در صفحه افقی (صفحه  $xz$ ) در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز، آنتن مذکور به عنوان یک گزینه مناسب جهت استفاده در گوشی موبایل سیستم مخابرات سلولی مطرح می‌باشد. البته، در حضور مدل آناتومیک سر، تقارن الگوی تابشی دستخوش تغییر خواهد شد. ضمناً به دلیل جذب و انعکاس توان برخوردی به سر، گین آنت به ویژه در فرکانس‌های بالاتر، در جهت سر کاهش خواهد یافت.

مسئله توسط یک مرز PML با ضخامت ۸ سلول احاطه شده است. ضمناً فاصله اجسام موجود در فضای حل از مرزهای PML (۸) به اندازه ۱۰ سلول در نظر گرفته شده است. آنتن توسط یک منبع ولتاژ در لبه پیچ در محل  $x=0, 99\text{ mm} \leq y \leq 101\text{ mm}$  و بین صفحه پیچ و صفحه زمین تحریک می‌شود. مقادیر ولتاژ و جریان به ترتیب روی منبع ولتاژ و در اطراف منبع تعریف شده است و یک پورت ورودی تشکیل می‌دهد (شکل (۳)). شکل موج منبع ولتاژ پالس گوسی در محدوده فرکانسی ۲۰۰۰-۶۰۰ MHz می‌باشد. شبیه‌سازی FDTD برای آنتن مذکور در هر دو حالت با پوشش و بدون پوشش پلاستیکی با ۵۰۰۰ پله زمانی ( $\Delta t = 1.733\text{ ps}$ ) انجام شده است. تلف برگشتی برای آنتن پیچ دو بانده در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با استفاده از پوشش پلاستیکی فرکانس تشدید در هر دو باند GSM و DCS کاهش می‌یابد، این نتیجه از لحاظ تئوری قابل پیش بینی می‌باشد زیرا با حضور دی الکتریک در فضای اطراف آنتن خطوط میدان الکتریکی بیشتری در اطراف آنتن متمرکز شده، لذا باعث افزایش خازن امپدانس ورودی آنتن شده و کاهش فرکانس رزونانس می‌گردد. این کاهش فرکانس تشدید در باند GSM تقریباً ۱۸ مگاهرتز و در باند DCS حدود ۴۵ مگاهرتز می‌باشد. ضمناً حضور پوشش پلاستیکی تأثیر ناچیزی روی مقدار تلف برگشتی در فرکانس‌های تشدید دارد.

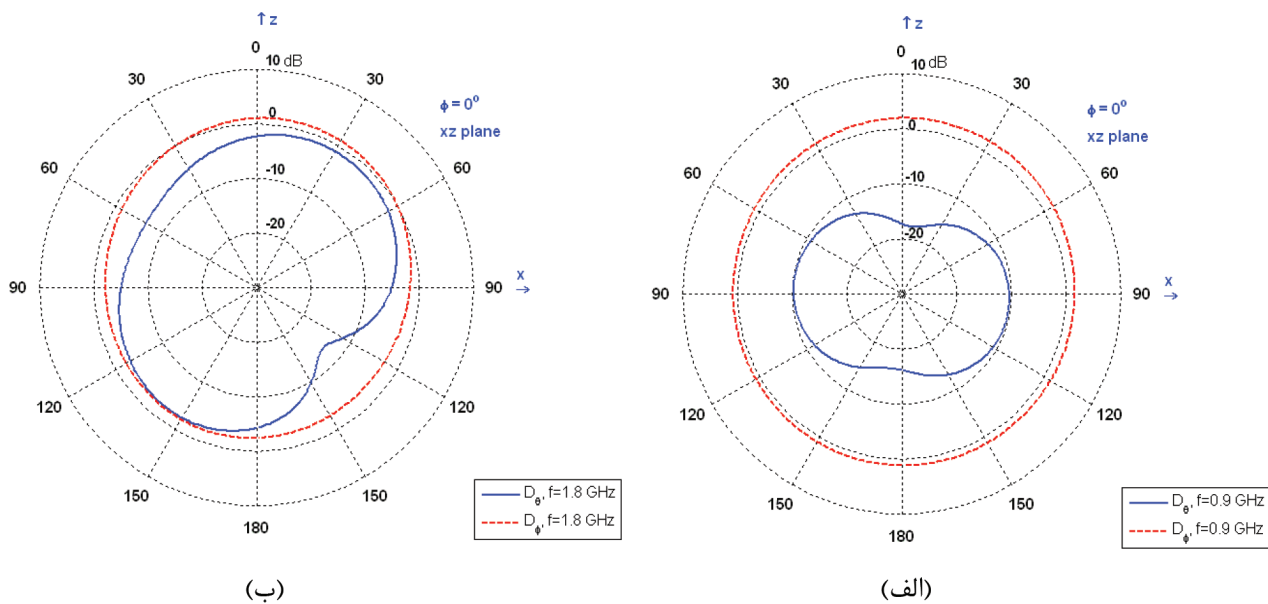


(ب)



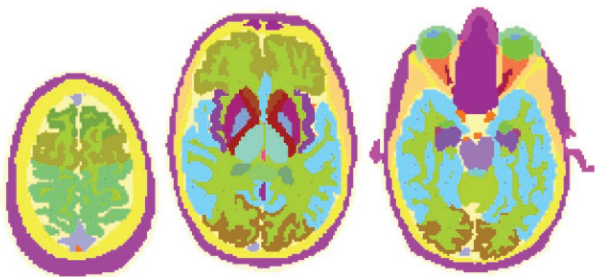
(الف)

شکل ۵- الگوی تابشی آنتن پیچ دوباندی با جعبه در صفحه  $yz$  (E-plane) (الف) فرکانس ۹۰۰ MHz، (ب) فرکانس ۱/۸ GHz



شکل ۶- الگوی تابشی آنتن پچ دوباندی با جعبه در صفحه  $xz$  (H-plane) (الف) فرکانس ۹۰۰ MHz، (ب) فرکانس ۱/۸ GHz

آمده است. ابتدا داده‌های جمع آوری شده در یک ماتریس با ابعاد  $256 \times 192$  ذخیره شده و سپس ابعاد ماتریس جهت انجام عملیات تبدیل فوریه برای تشکیل تصویر به صورت  $256 \times 256$  تغییر داده می‌شود. نهایتاً ابعاد پیکسل‌ها در صفحه برش برابر  $1/1$  mm و تعداد برش‌ها ۱۶۸ بوده و ضخامت هر برش  $1/4$  mm می‌باشد. لذا، این مدل سر دارای رزولوشن مکانی  $1/1 \times 1/1 \times 1/4$  mm می‌باشد. شکل (۷) سه برش عرضی دلخواه این مدل سر را نشان می‌دهد. مدل فانتوم سه بعدی سر دارای ابعاد  $256 \times 256 \times 168$  بوده و فقط برش‌های ۴-۱۶۸ حاوی اطلاعات می‌باشند. اکنون، بافت‌های موجود در هر برش اندیس گذاری می‌شود. در نتیجه تصویر اندیس گذاری شده بافت‌ها یک ماتریس  $256 \times 256$  می‌باشد که عناصر آن مقادیر صحیح بوده و هر عدد یک نوع بافت را مشخص می‌سازد (۱۲).



شکل ۷- سه برش عرضی دلخواه مدل ریاضی سر Yale

ج) مدل آناتومیک سر انسان: مدل‌های آناتومیک بدن برای انجام محاسبات عددی SAR ضروری می‌باشند. این مدل‌های عددی معمولاً با استفاده از تصاویر رزونانس مغناطیسی (MRI) یا اسکن‌های توموگرافی (CT) حاصل می‌شوند. تصاویر MRI یا CT داده‌های تصویری سیاه و سفید شامل تعداد زیادی برش‌های عرضی با فاصله مشخص از یکدیگر می‌باشند. رزولوشن در هر برش در حدود چند میلی‌متر می‌باشد. داده‌های MRI به دلیل شناسایی بافت‌های داخلی بدن نسبت به داده‌های CT ارجحیت دارند. لذا اغلب داده‌های MRI جهت ایجاد مدل‌های ریاضی بدن انسان استفاده می‌شوند. ابتدا تصاویر سیاه و سفید جهت ایجاد وکسل‌های مناسب تغییر مقیاس داده می‌شود. سپس مشخص می‌شود که هر وکسل به چه نوع بافتی تعلق دارد و به هر وکسل یک کد RGB (قرمز- سبز- آبی) که نوع بافت آن را مشخص می‌سازد نسبت داده می‌شود. نهایتاً همه تصاویر عرضی حاصل با هم ترکیب شده و مدل سه بعدی ریاضی بدن حاصل می‌شود.

در این مقاله، از مدل آناتومیک سر انسان که در دانشگاه Yale ارائه شده است (۱۱) استفاده می‌نماییم. جهت ایجاد این مدل یک مجموعه از تصاویر MRI که از یک مرد سالم ۳۵ ساله با وزن ۱۷۰ پوند و قد ۱۷۷ سانتی متر عکس برداری شده، مورد استفاده قرار گرفته است. این تصاویر از یک اسکنر ۱/۵ تسلا مدل GE Signa بدست

گرفته و سفارش شده است. در این مقاله ۲۱ نوع بافت و عضو مختلف در این مدل سر در نظر گرفته شده است. پارامترهای الکتریکی بافت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی FDTD در جدول (۱) ارائه گردیده است. این مقادیر از نتایج اندازه‌گیری‌هایی که روی بافت‌های تازه حیوانات کوچک صورت گرفته است استخراج شده است (۱۳).

(د) شبیه‌سازی تشعشع گوشی تلفن سیار در مجاورت مدل آناتومیک سر: جهت شبیه‌سازی اثر تشعشع آنتن گوشی روی سر با روش FDTD، مدل آناتومیک سر انسان (بخش ۲-۳) و مدل ارائه شده برای گوشی تلفن (بخش ۱-۲) را در کنار هم قرار می‌دهیم. ناحیه

جهت دستیابی به نتایج دقیق در شبیه‌سازی با روش FDTD در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز انتخاب ابعاد سلول کوچک‌تر از ۲/۵ mm کفایت می‌کند. بنابراین ابعاد مدل اصلی به رزولوشن نهایی ۲×۲×۱/۵ mm تغییر داده می‌شود.

در مدل‌های ریاضی بدن، لازم است مقادیر مناسب گذردهی نسبی و رسانایی به هر بافت اختصاص داده شود. داده‌های مورد نیاز با استفاده از برون‌یابی Cole-Cole ۴ بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، برای حیوانات کوچک در محدوده فرکانسی ۶۰۰۰ MHz - ۱۰ توسط آقای گابریل (۱۳) ارائه شده است. این اطلاعات توسط مؤسسات مختلف استاندارد سازی بین‌المللی مورد پذیرش قرار

جدول ۱- پارامترهای الکتریکی بافت‌های مدل آناتومیک سر در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز

چگالی جرمی ( $kg/m^3$ )	۱۸۰۰ MHz		۹۰۰ MHz		نوع بافت
	$\sigma$ [S/m]	$\epsilon_r$	$\sigma$ [S/m]	$\epsilon_r$	
۱۰۱۰	۰/۹۹	۳۸/۴	۰/۸۷	۴۱/۴	پوست
۱۰۱۰	۲/۶۲	۷۳/۳	۲/۱۲	۷۴	مایع مغزی
۱۰۴۰	۱/۵۷	۵۱/۵	۱/۱۹	۵۴/۷	طناب فقراتی
۱۸۱۰	۰/۵۵	۱۹/۷	۰/۳۲	۲۱	استخوان
۱۰۴۰	۱/۳۹	۵۳	۰/۹۴	۵۵	ماهیچه
۱۸۱۰	۰/۵۵	۱۹/۷	۰/۳۲	۲۱	ستون فقرات
۱۱۰۰	۱/۲۳	۳۸/۳	۰/۸۱	۴۰/۸	حلق
۹۲۰	۰/۲۵	۹/۴	۰/۱۱	۱۱/۳	چربی
۱۰۶۰	۱/۹	۶۰/۵	۱/۵۴	۶۱/۴	خون
۱۰۴۰	۰/۰۶۸	۵/۳۷	۰/۰۴	۵/۵	مغز استخوان
۱۱۰۰	۱/۲۳	۳۸/۳	۰/۸۱	۴۰/۸	غضروف
۱۰۴۰	۱/۳۴	۴۷/۹	۱/۰۳	۴۹/۶	غدد بناگوشی
۱۸۱۰	۲/۲۱	۷۱/۴	۲/۱	۷۲	مجرای فقرات
۱۰۴۰	۱/۳۴	۴۷/۹	۱/۰۳	۴۹/۶	مخچه
۱۰۴۰	۱/۲۴	۵۵/۱	۰/۸	۵۷	زبان
۱۰۴۰	۰/۸۴	۳۳/۱	۰/۶۱	۳۵/۷	ماده سفید
۱۰۴۰	۱/۵۷	۵۱/۵	۱/۱۹	۵۴/۷	ماده خاکستری
۱۰۴۰	۰/۸۵	۳۲/۲۶	۰/۶۱	۳۳/۴	عصب بینایی
۱۱۷۰	۱/۶۷	۵۰/۱	۱/۲۲	۵۲/۱	صلبیه چشم
۱۰۱۰	۲/۰۸	۷۳/۵	۱/۹۷	۷۴/۱	مایع چشم
۱۱۰۰	۱/۳۳	۴۹/۵	۰/۸۹	۵۱/۳	عدسی چشم



پایدار مورد نیاز می‌باشد. معمولاً تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به یک جواب پایدار در مسائل مربوط به محاسبه توان جذب شده در مدل‌های آناتومیک ناشی از تابش امواج الکترومغناطیسی در حدود ۱۲-۱۰ پریود زمانی انتخاب می‌شود.

نتایج اولیه حاصل از شبیه‌سازی FDTD، مقادیر زمانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در کلیه سلول‌های شبکه FDTD در پله‌های زمانی مختلف می‌باشد. به علت اشغال حافظه کامپیوتری زیاد، امکان ذخیره نتایج فوق در همه پله‌های زمانی وجود ندارد. از آنجا که جهت محاسبه SAR به مقادیر میدان نزدیک در حالت پایدار نیاز داریم، کافی است مقادیر میدان الکتریکی در آخرین پریود شبیه‌سازی ذخیره شوند. بنابراین مقادیر میدان الکتریکی در شبیه‌سازی ساختار در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب در ۴۰۰ و ۲۰۰ پله زمانی انتهایی ذخیره می‌شوند. در شبیه‌سازی FDTD به علت تحریک سینوسی آنتن، همه مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز در حالت پایدار نیز دارای تغییرات سینوسی با فرکانسی برابر فرکانس تحریک خواهند بود. به منظور یافتن دامنه نوسانات سینوسی مؤلفه‌های میدان، جهت کاهش زمان محاسبات و حافظه کامپیوتر، ماکزیمم میدان‌ها فقط در آخرین پریود شبیه‌سازی تعیین می‌گردند.

### نتایج

برای نمایش توزیع میدان الکتریکی در کلیه نقاط شبکه FDTD، مقدار ماکزیمم جمع برداری مؤلفه‌های میدان را در پله‌های زمانی مختلف به دست می‌آوریم. اگر این عمل روی تمام نقاط شبکه مش بندی شده انجام دهیم، حجم محاسبات به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین، ماکزیمم میدان الکتریکی کل فقط در صفحات XY، YZ و XZ ذخیره می‌شوند. شکل (۹) توزیع ماکزیمم میدان الکتریکی کل در داخل بافت سر، واقع در صفحه XY ( $Z=80$ ) برای فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز با دامنه ولتاژ ورودی یکسان، نمایش می‌دهند. مشاهده می‌شود که در فرکانس ۹۰۰ MHz میدان الکتریکی در این صفحه، عمدتاً در بافت گوش و مغز متمرکز بوده، در حالیکه پیک میدان و تمرکز آن، در فرکانس ۱۸۰۰ MHz در ناحیه پوست رخ می‌دهد.

در شکل (۱۰)، توزیع ماکزیمم میدان الکتریکی کل در داخل بافت

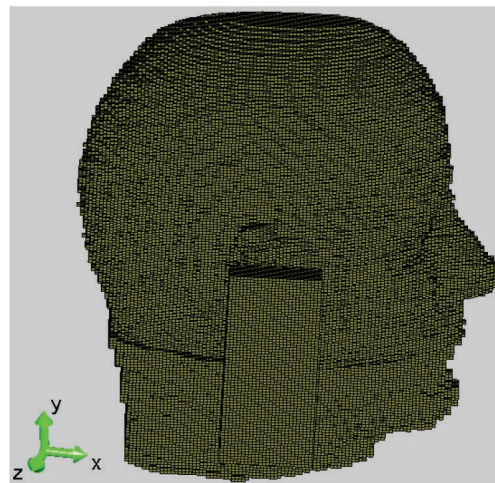
مش بندی شامل مدل سر، گوشی و فضای اطراف آنها دارای ابعاد  $139 \times 204 \times 155$  سلول می‌باشد. فرکانس‌های کار، فرکانس‌های سیستم مخابرات سلولی یعنی ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز در نظر گرفته می‌شود. توان خروجی آنتن در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب ۶۰۰ و ۲۵۰ میلی وات تنظیم می‌شود. موقعیت گوشی نسبت به مدل سر به گونه‌ای است که محور طولی آنتن در جهت Y و به موازات مدل آناتومیک سر بوده و در موقعیت تماس با گوش مدل سر قرار گرفته است. شکل (۸) شکل مسأله مش بندی شده شامل مدل سر و گوشی را نشان می‌دهد. روش عددی FDTD سه بعدی به همراه شرایط جذبی مرزی PML برای شبیه‌سازی مسأله به کار گرفته شده است.

روابط روزآمد FDTD برای میدان‌های داخل فضای حل و فاقد منبع استفاده شده و منبع تحریک از نوع منبع ولتاژ در لبه آنتن، بین صفحه پیچ و صفحه زمین اعمال می‌گردد. تحریک به صورت سینوسی در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز صورت می‌گردد:

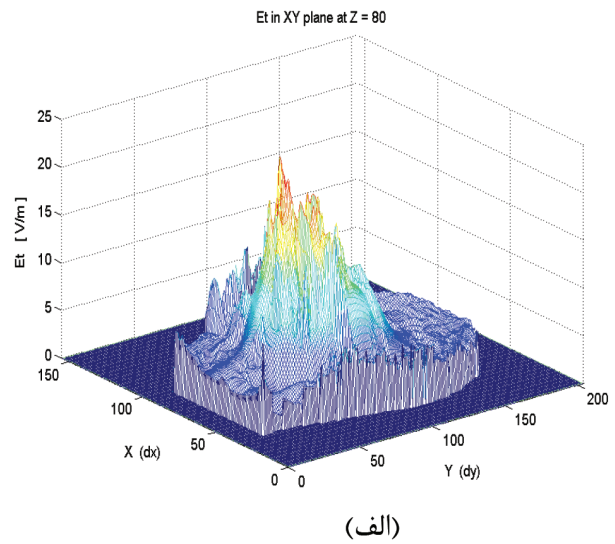
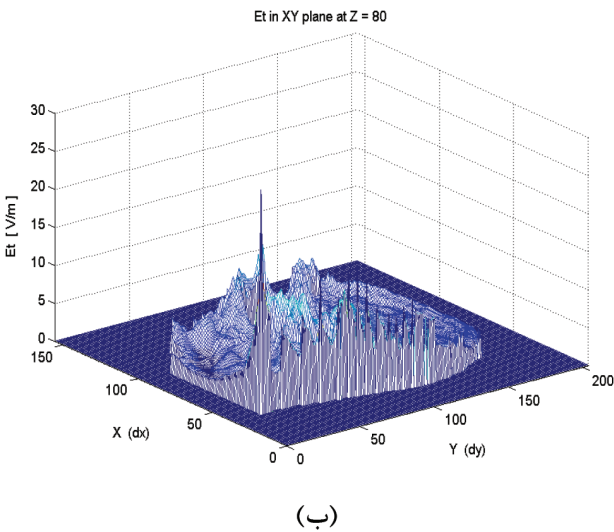
$$V(t) = V_m \sin(2\pi f t) \Rightarrow \quad (4)$$

$$V(n\Delta t) = V_m \sin(2\pi f n\Delta t).$$

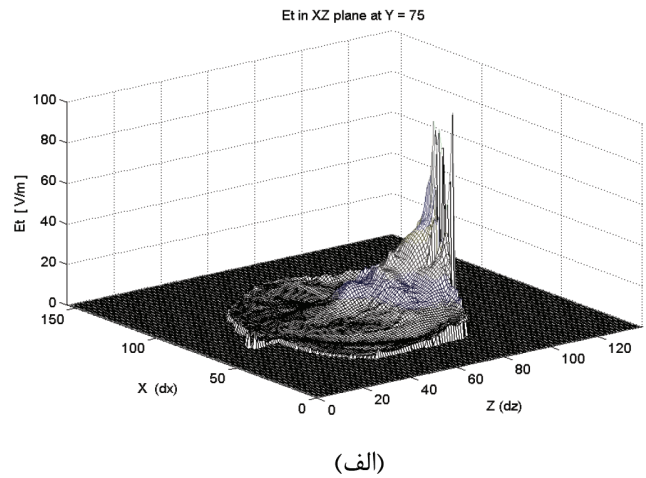
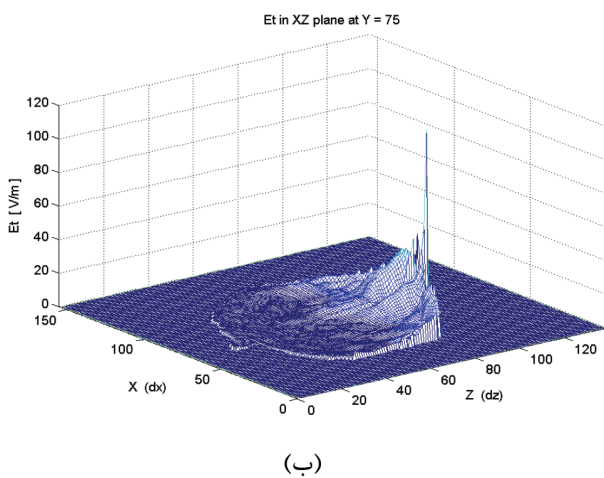
پله زمانی  $\Delta t$  در مسأله مذکور مطابق رابطه (۳) برابر  $3/08$  ps انتخاب می‌شود. مشاهده می‌شود در فرکانس ۹۰۰ MHz، پس از گذشت ۳۹۰۰ پله زمانی (۱۲ ns) جواب مسأله همگرا می‌شود. اما در فرکانس ۱۸۰۰ MHz به دلیل کاهش پریود نوسانات، تعداد پله‌های زمانی کمتری (۲۳۰۰ پله زمانی یا ۷ ns) جهت دستیابی به جواب



شکل ۸- گوشی موبایل در مجاورت مدل آناتومیک سر



شکل ۹- توزیع میدان الکتریکی کل در بافت‌های سر واقع در صفحه XY (الف) فرکانس ۹۰۰ MHz، (ب) فرکانس ۱۸۰۰ MHz.



شکل ۱۰- توزیع میدان الکتریکی کل در بافت‌های سر واقع در صفحه XZ (الف) فرکانس ۹۰۰ MHz، (ب) فرکانس ۱۸۰۰ MHz.

(الف) توزیع SAR محلی: پس از محاسبه میدان الکتریکی القاء شده در سر توسط روش FDTD، نرخ جذب ویژه محلی (SAR) در هر سلول واقع در مدل آناتومیک سر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SAR(i, j, k) = \frac{\sigma(i, j, k) [(E_{x_{max}} - E_{x_{min}})^2 + (E_{y_{max}} - E_{y_{min}})^2 + (E_{z_{max}} - E_{z_{min}})^2]}{8\rho(i, j, k)} \quad (5)$$

که در آن  $(i, j, k)$  موقعیت سلول مورد نظر در شبکه FDTD در مختصات دکارتی،  $(E_{x_{max}}, E_{x_{min}})$ ،  $(E_{y_{max}}, E_{y_{min}})$  و  $(E_{z_{max}}, E_{z_{min}})$  به ترتیب مقادیر پیک‌های مثبت و منفی مؤلفه‌های میدان الکتریکی در جهت‌های x, y, z می‌باشند.  $\sigma(i, j, k)$  رسانایی و  $\rho(i, j, k)$  چگالی جرمی بافت موجود در سلول  $(i, j, k)$  می‌باشند.

سر، واقع در صفحه XZ ( $Y = 75$ ) برای فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود، پیک میدان در فرکانس ۹۰۰ MHz در بافت‌های پوست و گوش و در فرکانس ۱۸۰۰ MHz در بافت پوست اتفاق می‌افتد. ضمناً، شدت میدان‌های نسبتاً زیادی در این برش سر، به ویژه در مجاورت آنتن مشاهده می‌شود. البته این نتیجه قابل پیش‌بینی می‌باشد، زیرا گوشی موبایل در موقعیت تماس با گوش مدل آناتومیک قرار داشته و آنتن داخلی آن در فاصله حدود ۲-۱ سانتیمتر از سر کاربر تشعشع می‌نماید. لذا، انتظار می‌رود که شدت میدان‌های بالایی در اطراف سر وجود داشته باشد. همچنین توزیع میدان در فرکانس ۱۸۰۰ MHz به دلیل کاهش عمق نفوذ، عمدتاً بصورت سطحی می‌باشد.

پوست و دیگری در بافت غضروفی گوش. لذا بیشترین جذب توان در ناحیه پوست و سپس در بافت غضروفی گوش اتفاق می افتد. با توجه به این که بافت پوست از قدرت دفع حرارت بالایی برخوردار است در نتیجه در اثر افزایش دمای داخل بافت ناشی از تابش امواج گوشه موبایل کمتر دچار صدمه می شود.

ب) توزیع SAR محلی: SAR متوسط یک گرم، با محاسبه مقدار متوسط SAR روی حجم مکعبی شامل N سلول که دارای جرم تقریبی یک گرم می باشد، تعیین می گردد. با توجه به جدول (۱) چگالی جرمی اکثر بافت های سر به جز بافت های استخوانی (جمجمه، ستون فقرات و...) تقریباً در حدود  $(kg/m^3)$  ۱۰۰۰ می باشد. لذا حجم مکعب یک گرمی جهت متوسط گیری در حدود  $1\text{ cm}^3$  می باشد. ابعاد سلول های FDTD برای حل مسأله  $2 \times 1/5 \times 2\text{ mm}$  می باشند که دارای حجم  $6\text{ mm}^3$  هستند. لذا تعداد سلول های موجود در حجم مکعبی شامل N سلول از بافت سر با جرم تقریبی یک گرم به آسانی به صورت زیر حاصل می شود:

$$N = N_x \times N_y \times N_z = \frac{1\text{ cm}^3}{6\text{ mm}^3} \approx 167\text{ cell}$$

$$\begin{cases} 5 \times 8 \times 4 = 160 \\ 5 \times 7 \times 5 = 175 \\ 6 \times 5 \times 6 = 180 \end{cases} \quad \text{حجم های انتخابی به فرم}$$

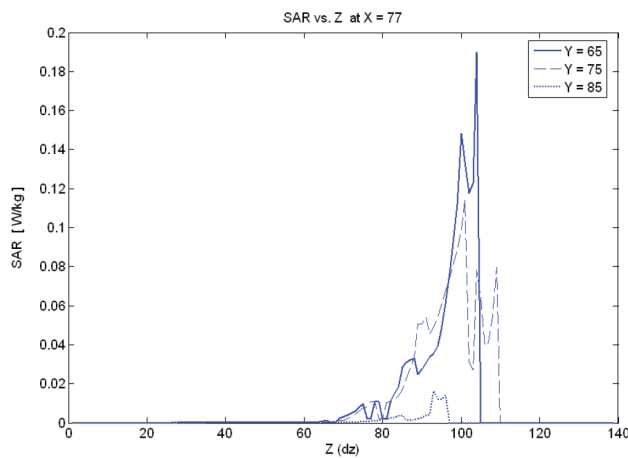
جرم های تقریبی در حدود یک گرم دارند.

نظر به اینکه بافت های مجاور آنتن گوشه موبایل عمدتاً در تعیین

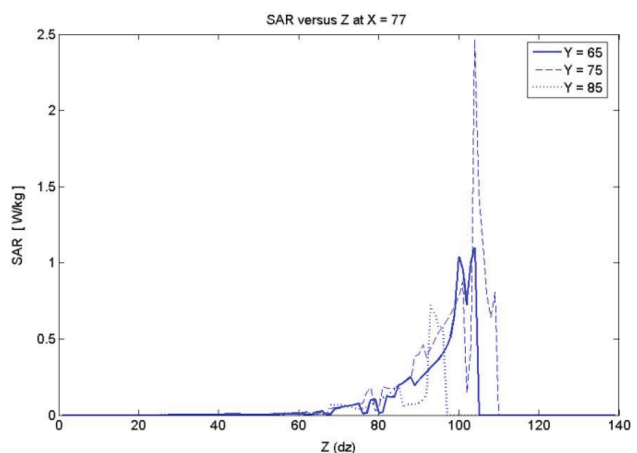
جهت محاسبه SAR در مدل آناتومیک سر توان خروجی آنتن مطابق استاندارد (۱۵) در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب ۶۰۰ و ۲۵۰ میلی وات تنظیم می شود. لذا در تمام محاسبات بایستی توان خروجی آنتن در فرکانس مورد نظر ثابت باشد. این عمل با تنظیم دامنه ولتاژ ورودی صورت می گیرد. دامنه های ولتاژ ورودی مطلوب، جهت دستیابی به توان های خروجی ۶۰۰ و ۲۵۰ میلی وات در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب برابر ۸/۳۵ و ۳/۹۷ ولت می باشند. لازم به ذکر است، به علت قرارگیری مدل سر در مجاورت آنتن گوشه موبایل هر گونه تغییری در وضعیت قرارگیری گوشه و همچنین شکل و اندازه گوشه تلفن اثرات محسوسی بر توزیع میدان داخل سر و در نتیجه توزیع SAR خواهد داشت.

در شکل (۱۱) توزیع SAR محلی در مدل سر بر حسب Z برای برش های عرضی مختلف در  $X=77$  نشان داده شده است. مشاهده می شود محل وقوع پیک SAR محلی در برش های مختلف در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب در بافت های گوش و پوست می باشد. ضمناً همان طور که انتظار می رفت مقدار عددی SAR درون بافت های سر به طرف داخل سر سریعاً کاهش می یابد. علت آن تضعیف میدان الکتریکی در اثر انتشار در محیط با تلف می باشد.

همان طور که در شکل (۱۱-ب) مشاهده می شود توزیع SAR در فرکانس ۱۸۰۰ MHz دارای دو پیک محلی می باشد یکی در ناحیه



(ب)



(الف)

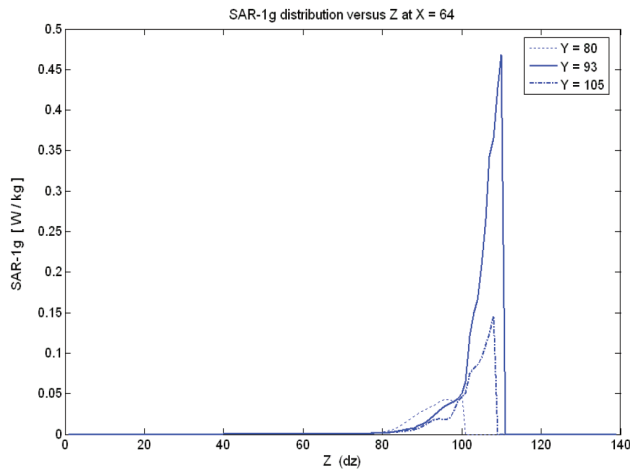
شکل ۱۱- توزیع SAR محلی در برش های عرضی مختلف بر حسب Z (الف) فرکانس ۹۰۰ MHz (ب) فرکانس ۱۸۰۰ MHz.

فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز در برش های عرضی که پیک SAR متوسط اتفاق می افتد، نشان می دهد. مشاهده می شود، فرم توزیع SAR تغییرات چندانی نمی کند اما تغییرات SAR متوسط به علت فرآیند متوسط گیری آهسته تر از تغییرات SAR محلی می باشد. همچنین مقادیر SAR متوسط به ویژه در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز کمتر از مقادیر SAR محلی می باشند.

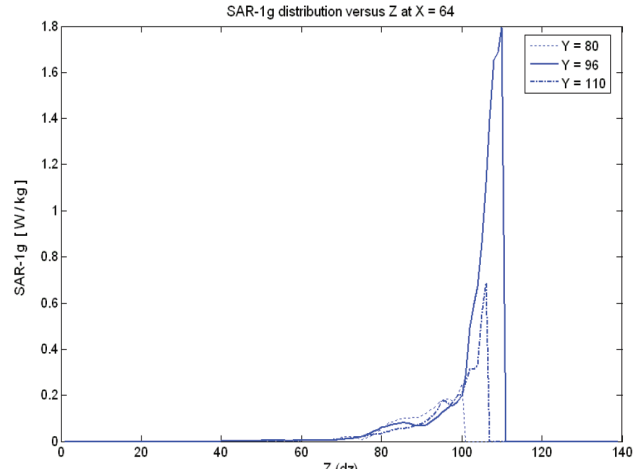
جدول (۲) مقادیر پیک SAR محلی و پیک SAR متوسط یک گرم و SAR متوسط کل را در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان می دهد. مشاهده می شود که پیک SAR یک گرم در فرکانس های مذکور در بافت غضروفی گوش اتفاق می افتد. نکته جالب در این جدول این است که مقدار SAR محلی در بافت CFS (مایع مغزی)

ماکزیمم SAR متوسط نقش دارند و چگالی این بافت ها در محدوده  $(kg / m^3)$  ۹۲۰-۱۱۰۰ قرار دارند. بنابراین انتخاب مکعبی به ابعاد  $5 \times 7 \times 5$  جرم تقریبی یک گرم بهتری نسبت به سایر حالات ایجاد خواهد نمود.

شکل (۱۲) توزیع SAR متوسط یک گرم بر حسب Z در در برش های عرضی مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود پیک SAR متوسط یک گرم در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب در برش های  $\gamma = 93$  و  $\gamma = 96$  در بافت غضروفی گوش رخ داده و مقادیر آن به ترتیب  $1/795$  و  $0/4683$  وات بر کیلوگرم می باشد. ضمناً فقط یک پیک SAR متوسط در برش های مختلف مشاهده می شود. شکل (۱۳) توزیع SAR متوسط یک گرم را بر حسب Z در

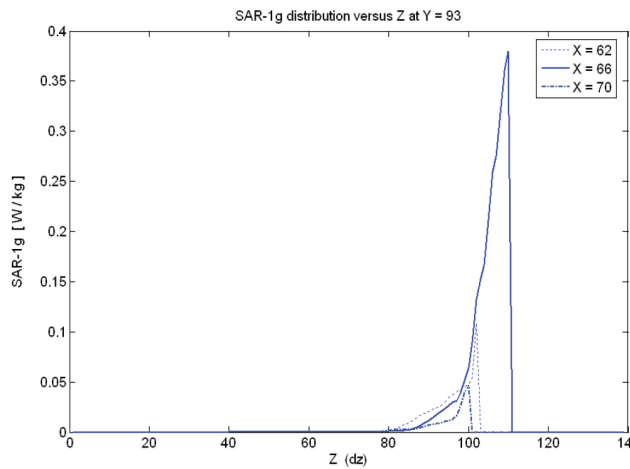


(ب)

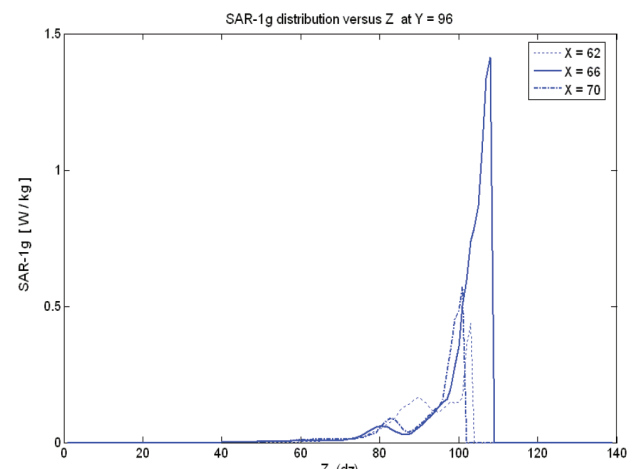


(الف)

شکل ۱۲- توزیع SAR متوسط یک گرم در برش های مختلف سر (الف) فرکانس ۹۰۰ MHz، (ب) فرکانس ۱۸۰۰ MHz

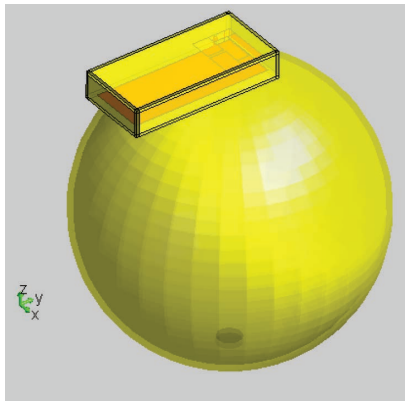


(ب)



(الف)

شکل ۱۳- توزیع SAR متوسط یک گرم (الف) فرکانس ۹۰۰ MHz در برش  $\gamma = 96$ ، (ب) فرکانس ۱۸۰۰ MHz در برش  $\gamma = 93$



شکل ۱۴- آنتن پیچ دوباندی در مجاورت فانتوم کروی سر

سلول  $2 \times 2 \times 2$  mm می‌باشد. برای اطمینان از همگرایی شبیه‌سازی FDTD، نمو پله زمانی  $\Delta t = 3/466$  ps انتخاب می‌شود. دامنه‌های ولتاژ ورودی سینوسی در پورت ورودی آنتن در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب با  $15/24$  و  $8/67$  ولت، قرار داده می‌شود (توان ورودی ۱ W). مشاهده می‌شود در فرکانس ۹۰۰ MHz، پس از گذشت ۲۸۸۰ پله زمانی (۱۰ ns) جواب مسأله همگرا می‌شود. اما در فرکانس ۱۸۰۰ MHz به دلیل کاهش پیروی نوسانات، تعداد پله‌های زمانی کمتری (۲۰۰۰) پله زمانی یا (۷ ns) جهت دستیابی به جواب پایدار مورد نیاز می‌باشد.

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مقادیر SAR محلی در فانتوم سر، حاصل از شبیه‌سازی FDTD و نرم افزارهای XFDTD و CST بر حسب فاصله از گوشی موبایل، در دو برش عرضی متفاوت در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز مقایسه شده است. در هر دو شکل، دو پیک SAR در پوسته شیشه‌ای و مایع شبیه ساز مغز (در مجاورت پوسته) مشاهده می‌شود. ضمناً، مقادیر SAR در فرکانس ۱۸۰۰ MHz کمتر از مقادیر SAR در فرکانس ۹۰۰ MHz می‌باشد. مطابق شکل‌های (۱۵) و (۱۶) تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج نرم افزارهای تمام موج وجود دارد. البته اختلاف در مقدار پیک اول SAR در پوسته شیشه‌ای دیده می‌شود. این اختلاف به دلیل مدل سازی منبع در نرم افزارهای XFDTD و CST می‌باشد. از آنجا که پارامتر SAR بر حسب مقادیر میدان‌های الکتریکی القا شده در فانتوم در ناحیه میدان نزدیک آنتن محاسبه می‌شود و این میدان‌ها شدیداً به نحوه تغذیه آنتن و ساختار هندسی آنتن و جسم تحت تابش بستگی دارند، لذا مقادیر SAR به ویژه در مجاورت آنتن، تحت تاثیر مدل سازی تغذیه آنتن قرار

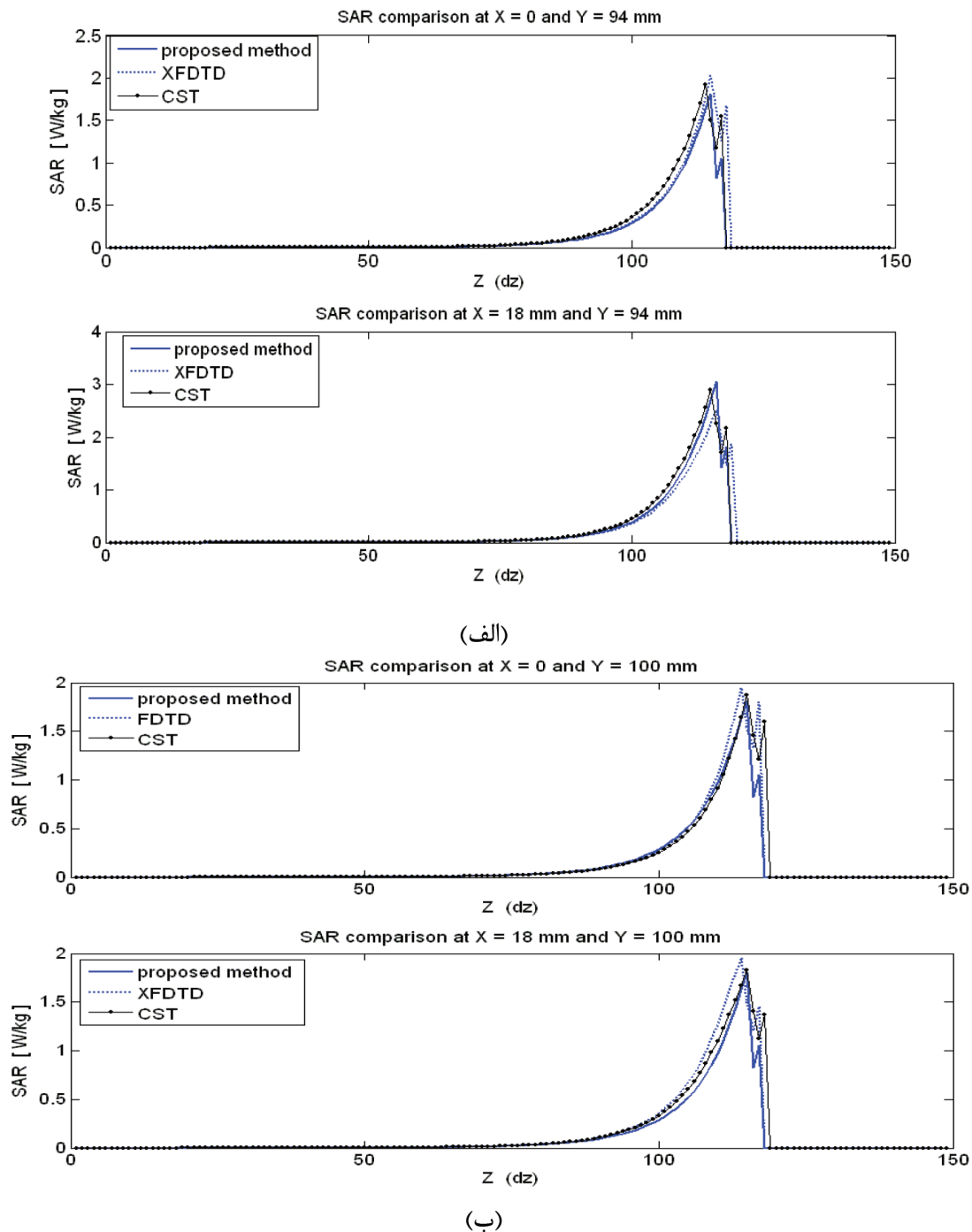
جدول ۲- مقادیر SAR محلی و SAR متوسط یک گرم در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز.

فرکانس		کمیت
۱۸۰۰ MHz	۹۰۰ MHz	
۰/۲۵	۰/۶	توان خروجی (W)
۲/۳۶۵	۶/۶۷۶	پیک SAR محلی (W/kg)
۰/۴۰۴	۱/۷۵۳	پیک SAR محلی در CFS (W/kg)
۰/۰۶۰	۰/۷۷۶	پیک SAR محلی در مغز (W/kg)
۰/۴۶۸	۱/۷۹۵	پیک SAR متوسط یک گرم (W/kg)
۰/۰۴۱	۰/۳۳۱	پیک SAR یک گرم در مغز (W/kg)
۰/۴۶۸	۱/۷۹۵	پیک SAR یک گرم در گوش (W/kg)
۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	پیک SAR یک گرم در چشم (W/kg)

از مقدار SAR محلی در بافت مغز به مراتب بیشتر می‌باشد. علت آن رسانایی بیشتر CFS نسبت به رسانایی بافت مغز می‌باشد (جدول (۱)). همچنین به علت کم شدن نفوذ توان الکترومغناطیسی در بافت‌های مغز با افزایش فرکانس، SAR محلی و SAR متوسط یک گرم در مغز کاهش می‌یابد.

**ج) راست آزمایی نتایج شبیه‌سازی:** جهت راست آزمایی روش ارائه شده، نتایج حاصل با نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار تمام موج XFDTD و CST مقایسه گردیده است. از آنجا که امکان وارد کردن مدل آناتومیک سر در نرم افزار XFDTD و CST وجود ندارد، از فانتوم مدل کروی سر (۱۶) در مجاورت آنتن پیچ دوباندی (بخش (۲-۲)) استفاده شده است. این فانتوم شامل یک پوسته کروی شیشه‌ای می‌باشد که با مایعات شبیه ساز بافت سر با مشخصات الکتریکی مطابق جدول (۳)، پر شده است (شکل (۱۴)). شعاع خارجی فانتوم ۱۰۰ mm و شعاع داخلی آن ۹۶ mm می‌باشد. ضمناً فاصله بین فانتوم سر و گوشی موبایل ۴ mm در نظر گرفته شده است. فضای حل مساله FDTD شامل  $136 \times 136 \times 148$  سلول بوده و ابعاد هر جدول ۳- خواص دی الکتریک مواد تشکیل دهنده فانتوم کروی.

مواد	$\epsilon_r$	$\sigma$ [S/m]	$\rho$ ( $g/cm^3$ )
مایع شبیه‌ساز مغز در ۹۰۰ MHz	۴۲	۰/۹۹	۱
مایع شبیه‌ساز مغز در ۱/۸ GHz	۴۰	۱/۳۸	۱
پوسته کروی شیشه‌ای	۴/۶	۰/۹۹	۲/۵



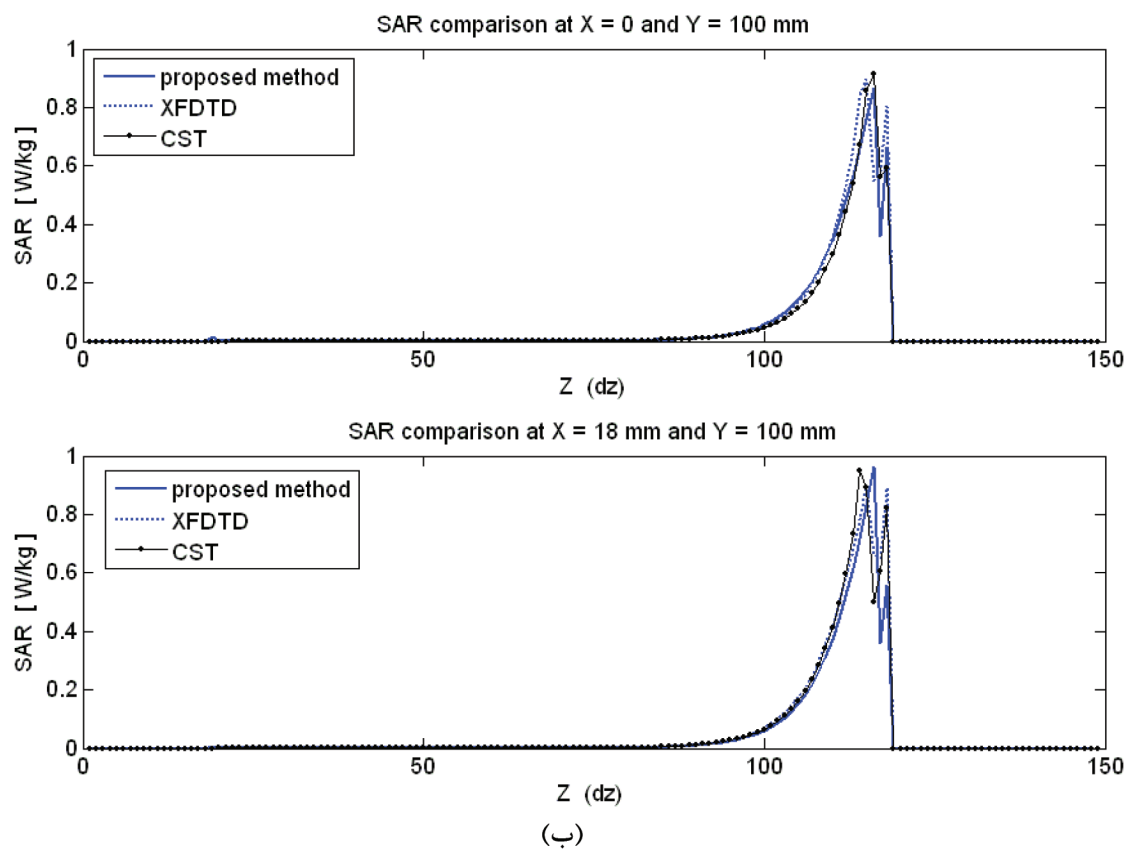
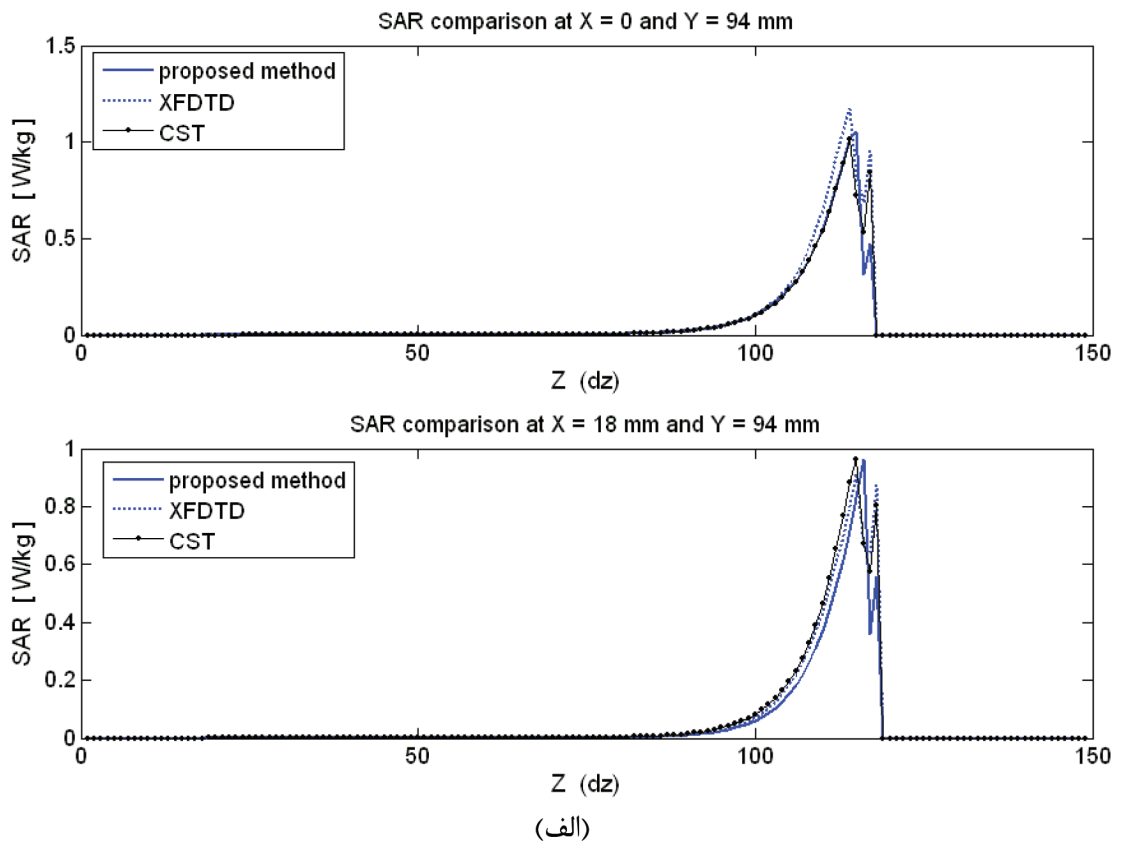
شکل ۱۵- توزیع SAR محلی در مدل سر بر حسب Z در فرکانس ۹۰۰ MHz (الف) برش عرضی  $Y = 94 \text{ mm}$  (ب) برش عرضی  $Y = 100 \text{ mm}$ .

مجاورت مدل آناتومیک سر توسط الگوریتم FDTD شبیه سازی شده است. در این بخش پس از استخراج معادلات روزآمد FDTD، ابتدا آنتن پچ دو بانندی همراه با جعبه توسط روش FDTD شبیه سازی گردید و پارامترهای آنتن مانند الگوی تابشی و تلف برگشتی آنتن، تعیین شد. سپس آنتن پچ دو بانندی در وضعیت تماس با مدل آناتومیک سر، با روش FDTD شبیه سازی شده و توزیع میدان الکتریکی در

خواهد گرفت. در XFDTD و CST تغذیه آنتن توسط یک سیم بین صفحه زمین و پچ (پروب تغذیه) صورت می گیرد. منبع ولتاژ در ابتدای سیم بین سیم و صفحه زمین اعمال می شود.

## بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، تشعشعات یک گوشی موبایل شامل آنتن پچ دو بانندی در



شکل ۱۶- توزیع SAR محلی در مدل سر بر حسب z در فرکانس ۱۸۰۰ MHz (الف) برش عرضی Y = ۹۴ mm (ب) برش عرضی Y = ۱۰۰ mm.

در ناحیه پوست و سپس در بافت غضروفی گوش اتفاق می افتد. با مشاهده توزیع SAR متوسط یک گرم مشخص گردید که پیک SAR متوسط یک گرم در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب در برش های  $Y = 96$  و  $Y = 93$  و در بافت غضروفی گوش رخ داده و مقادیر آن به ترتیب  $1/795$  و  $0/4683$  وات بر کیلوگرم می باشد. همچنین مقادیر SAR متوسط به ویژه در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز کمتر از مقادیر SAR محلی می باشند. در پایان، جهت راست آزمایی روش ارائه شده، آنتن مذکور در مجاورت فانتوم کروی سر شبیه سازی شده و نتایج با نرم افزار تمام موج XFDTD و CST مقایسه گردید.

برش های مختلف سر نمایش داده شد. مشاهده گردید، در فرکانس ۹۰۰ MHz میدان الکتریکی در این صفحه، عمدتاً در بافت گوش و مغز متمرکز بوده، در حالیکه پیک میدان و تمرکز آن، در فرکانس ۱۸۰۰ MHz در ناحیه پوست رخ می دهد. از طرفی با افزایش فرکانس به علت کاهش میزان نفوذ توان الکترومغناطیس در بافت های سر، دامنه میدان و لذا توان تلف شده در مغز کاهش می یابد. با استفاده از نتایج حاصل، توزیع SAR محلی و SAR متوسط یک گرم محاسبه گردید. محل وقوع پیک SAR محلی در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز در بافت غضروفی گوش می باشد. ضمناً، توزیع SAR در فرکانس ۱۸۰۰ MHz دارای دو پیک محلی می باشد یکی در ناحیه پوست و دیگری در بافت غضروفی گوش. لذا بیشترین جذب توان

## References

- 1- Taflove A and Brodwin M. E, Computation of the Electromagnetic Fields and Induced Temperatures within a model of the Microwave-irradiated Human Eye, IEEE Trans. on MTT, Vol. 23, No. 11, pp. 888-896, Nov. 1975.
- 2- Sullivan D. M, Gandhi O. P, and Taflove A, Use of the Finite-Difference Method for Calculation of EM Absorption in Man Model, IEEE Trans. Bio. Engr., vol. BME-35, No. 3, pp. 179-186, Nov. 1988.
- 3- Chen Y., and Wang H, Current and SAR Induced in a Human Head Model by the Electromagnetic Fields Irradiated from a Cellular Phone, IEEE Trans. MTT, vol. 42, No. 12, pp. 2249-2254, Dec. 1994.
- 4- Rahmat-Samii Y, Kim W, Antenna and human in personal communications: Application of modern EM computational techniques, Proc. IEEE, pp.36-55, 1999.
- 5- Jensen A and Rahmat-Samii Y, EM Interaction of Handset Antennas and a Human in Personal Communication, Proc. IEEE, Vol. 83, No. 1, pp. 7-17, Jan. 1995.
- 6- Wang J and Fujiwara O, FDTD computation of temperature rise in the human head for portable telephones, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 47, p. 1528, Aug. 2000.
- 7- Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S and Piuza, Specific Absorption Rate and Temperature Increases in the Head of a Cellular-Phone User, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 48, pp.1118-1126, July 2000.
- 8- M. N. O. Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press, Boca Ratone, 2nd edition, chapter 5, 2001.
- 9- Taflove A, Hagness C, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Boston Inc., Boston, 3rd edition, 2005.
- 10- Fransson M, SAR simulation with SEMCAD, Master thesis, Lunds university, 2001.
- 11- Zubal G, Harrell R and Smith O, Two dedicated software, voxel-based, anthropomorphic (torso and head) phantoms, Yale University School of Medicine, New Haven, CT 06510, 1996.
- 12- Zubal G, Harrell R and Smith O, High Resolution, MRI-Based, Segmented, Computerized Head Phantom, Processing Group, Dept. of Diagnostic Radiology, Yale University, New Haven, CT, 06510 USA, 1996.
- 13- Gabriel S, Lau R W, and Gabriel C, The Dielectric Properties of Biological Tissues: III. Parametric Models for the Dielectric Spectrum of Tissues, Phys. Med. Bio. 41, 2271-2293, Nov. 1996.