

بهبود طول عمر سیستم‌های نهفته بی‌درنگ به کمک زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری

صغری منوچهری و مهدی کارگهی

و پیشینه‌کردن طول عمر باتری بسیار حائز اهمیت است. به دلیل رفتار غیر خطی باتری در روند تخلیه یا دشارژ^۲، پیشینه‌کردن طول عمر آن مسأله‌ای سخت و چالش برانگیز است. همچنین به علت وابستگی میزان انرژی استخراج‌شده از باتری به الگوی جریان دشارژ آن، می‌توان با کنترل سطح جریان و الگوی دشارژ طول عمر باتری را افزایش داد. در این مقاله به ارائه یک روش مبتنی بر تغییر الگوی جریان دشارژ در طول اجرای وظایف روی پردازنده‌ای با قابلیت تغییر پویای ولتاژ^۳ (DVS) می‌پردازیم که هدف آن پیشینه‌کردن بهره‌وری باتری است.

در سال‌های اخیر طراحی سیستم‌های مبتنی بر باتری یک مقوله مهم و جدی بوده است. کارهایی که تا کنون در این زمینه انجام شده به چند دسته عمده تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) مدل‌کردن باتری و توصیف رفتار غیر خطی آن [۱]، (۲) مدیریت توان و انرژی مصرفی باتری [۲] تا [۴] و (۳) زمان‌بندی وظایف در سیستم‌های مبتنی بر باتری.

مهم‌ترین مدل‌هایی که تا کنون برای باتری ارائه شده‌اند عبارتند از: الف) مدل الکتروشیمیایی [۵] تا [۱۰]، ب) مدل مدارهای الکتریکی [۱۱] تا [۱۳]، ج) مدل‌های تحلیلی (این مدل‌ها شامل مدل KiBaM و مدل نفوذی (ریزشی) هستند) [۱۴] تا [۱۸] و د) مدل‌های تصادفی [۱۶] و [۱۹] تا [۲۲].

تأثیر دو خصوصیت غیر خطی باتری، اثر نرخ ظرفیت^۴ و اثر بازیابی (بهبود)^۵، در طول عمر آن و سیستم‌های نهفته مبتنی بر باتری در [۲۳] مورد بررسی قرار گرفته و مزایا و معایب این دسته از باتری‌ها شرح داده شده است. در [۱۴] نویسندگان یک مرور کلی روی مدل‌های متفاوت باتری انجام داده و مدل‌ها را از لحاظ مناسب بودن برای ترکیب با مدل بار کاری^۶ در جهت ایجاد یک مدل باتری بهتر و قوی‌تر ارزیابی کردند. در [۲۴] نویسندگان روی دو مدل تحلیلی معروف به نام‌های KiBaM^۷ و مدل نفوذی^۸ بررسی کاملی انجام داده و مناسب بودن این مدل‌ها را با هدف ارزیابی کارایی آزمایش کردند.

در راستای مدیریت توان و انرژی مصرفی باتری، تلاش‌های فراوانی در زمینه استفاده از تکنیک تغییر پویای ولتاژ به عنوان یک ابزار کاهش مصرف انرژی صورت گرفته است. در اغلب مطالعات انجام‌شده بر مبنای تغییر پویای ولتاژ، باتری به عنوان یک منبع ایده‌آل انرژی است که مقدار معین انرژی را در یک ولتاژ خروجی ثابت، ذخیره یا پخش می‌کند. لیکن بر اساس تحقیقات انجام‌شده [۱۵]، [۲۲]، [۲۵] و [۲۶]، این امر همیشه

چکیده: بسیاری از سیستم‌های نهفته و دستگاه‌های متحرک برای تأمین انرژی مورد نیاز خود از باتری استفاده می‌کنند و بنابراین طول عمر این دستگاه‌ها به طول عمر باتری وابسته است. بر این اساس، جهت افزایش میزان بهره‌وری از این گونه سیستم‌ها، کاهش مصرف انرژی و مدیریت نحوه استفاده از باتری اهمیت زیادی دارند. با توجه به خصوصیات و رفتار غیر خطی باتری، پیشینه‌کردن طول عمر باتری که به الگوی تخلیه آن نیز وابسته است از مسایل سخت محسوب می‌گردد. این مقاله جهت افزایش طول عمر سیستم و پیشینه‌کردن بهره‌وری از باتری، به ارائه یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری برای وظایف دوره‌ای در سیستم‌های بی‌درنگ مبتنی بر باتری می‌پردازد. در الگوریتم پیشنهادی یک روش ابتکاری حریمانه برای تغییر پویای ولتاژ با توجه به خصوصیات باتری و توان مصرفی وظایف ارائه می‌گردد. الگوریتم ارائه‌شده با دو روش ارزیابی می‌شود، در روش اول از تابع هزینه مبتنی بر شارژ مصرفی باتری استفاده می‌شود و در روش دوم از یک شبیه‌ساز سطح پایین باتری‌های لیتیوم-یون به نام Dualfoil بهره‌برداری خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی منجر به افزایش طول عمر سیستم بین ۱۹/۶-۴/۳ درصد در شرایط مختلف (از نظر بار کاری سیستم و محدوده توان مصرفی وظایف) شده است.

کلید واژه: سیستم‌های نهفته بی‌درنگ، تغییر پویای ولتاژ، زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری، مصرف توان.

۱- مقدمه

امروزه باتری نقش بسزایی در تأمین انرژی بسیاری از سیستم‌های نهفته بی‌درنگ ایفا می‌کند. درصد قابل توجهی از این دستگاه‌ها قابلیت شارژ مجدد باتری را ندارند و به دلیل نوع و محل به کارگیری، جایگزین کردن باتری نیز در آنها امکان‌پذیر نیست و بنابراین طول عمر این دستگاه‌ها وابسته به طول عمر باتری است.

در اکثر فناوری‌های مربوط به باتری، اگر ولتاژ باتری از حد مورد نیاز سیستم (ولتاژ قطع^۱) پایین‌تر بیاید، آن باتری دیگر قادر به تأمین انرژی مورد نیاز سیستم نیست و آن سیستم دیگر نمی‌تواند به کار خود ادامه دهد. در این حالت لزوماً انرژی ذخیره‌شده در باتری تمام نشده است، بلکه برای برآورده کردن ولتاژ مورد نظر کافی نیست و در اصطلاح می‌گوییم باتری خالی شده است، حال آن که این باتری برای سیستمی که ولتاژ قطع آن کمتر باشد قابل استفاده خواهد بود. بر این اساس، کاهش مصرف انرژی و مدیریت نحوه استفاده از باتری جهت افزایش میزان بهره‌وری آن

این مقاله در تاریخ ۶ آذر ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۲۳ شهریور ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

صغری منوچهری، آزمایشگاه سیستم‌های بی‌درنگ و اتکاپذیر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، (email: s.manoochehri@ut.ac.ir).
مهدی کارگهی، آزمایشگاه سیستم‌های بی‌درنگ و اتکاپذیر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، (email: kargahi@ut.ac.ir).

1. Cut-off Voltage

2. Discharge Current
3. Dynamic Voltage Scaling
4. Rate Capacity Effect
5. Recovery Effect
6. Workload Model
7. Kinetic Battery Model
8. Diffusion Model

جدول ۴: چند پروفایل مختلف برای اجرای هر دو وظیفه.

پروفایل	توان (W)	مدت زمان اجرا (min)
	۰٫۱۸۱۵	۶
A1-B5	۰٫۱۷۹	۱۰٫۲۴۱
	۰٫۰	۰٫۷۵۹
	۰٫۱۲۴۰	۶٫۷۵۲
A2-B4	۰٫۲۹۹	۸٫۶۱۹
	۰٫۰	۱٫۵۹۹
	۰٫۰۸۱۳	۷٫۷۸۲
A3-B4	۰٫۲۹۹	۸٫۶۱۹
	۰٫۰	۰٫۵۹۹
	۰٫۰۵۹۸	۸٫۶۱۹
A4-B3	۰٫۴۰۷	۷٫۷۸۲
	۰٫۰	۰٫۵۹۹
	۰٫۰۹۰۸	۶
B1-A5	۰٫۳۵۹	۱۰٫۲۴۱
	۰٫۰	۰٫۷۵۹
	۰٫۰۶۲۰	۶٫۷۵۲
B2-A4	۰٫۰۵۹۸	۸٫۶۱۹
	۰٫۰	۱٫۵۹۹

از وظایف دوره‌ای، زمان با طول ابردوره و برای وظایف غیر دوره‌ای زمان با بیشترین موعد برابر است. مرجع [۲۵] با اشاره به این مطلب که مسأله بهینه‌سازی مربوط یک مسأله حل‌نشده در زمان چندجمله‌ای بر حسب اندازه ورودی مسأله^۲ (NP-hard) است (حتی اگر وظایف اولویت ثابت داشته باشند) به ارائه یک روش ابتکاری حریصانه برای دست‌یابی به نتایجی نزدیک به بهینه می‌پردازد.

در بخش ۲ با ذکر چند سناریو، دلایل پرداختن به مسأله مطرح‌شده را بیان می‌کنیم. مدل سیستم و طرح مسأله را در بخش ۳ شرح می‌دهیم. در بخش ۴ به توضیح الگوریتم پیشنهادی با جزئیات کامل می‌پردازیم. بخش ۵ نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی طی آزمایش‌های متفاوت را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد و در بخش ۶ به نتیجه‌گیری نهایی می‌پردازیم.

۲- پیش‌زمینه و انگیزه تحقیق

در این بخش با شرح چند سناریو به ضرورت ارائه یک الگوریتم زمان‌بندی مبتنی بر باتری در طراحی سیستم می‌پردازیم. در سناریوی اول به اهمیت تغییر پویای ولتاژ و نحوه چیدمان وظایف و تأثیر آنها بر طول عمر باتری پرداخته‌ایم (جدول ۱ تا ۷ و شکل‌های ۱ تا ۳). جدول ۱ مشخصات دو وظیفه که مدت زمان اجرا و موعد نسبی یکسان اما جریان و توان مصرفی متفاوتی را دارند، نشان می‌دهد. در جداول ۲ و ۳ با فرض این که پردازنده دارای ۵ سطح ولتاژ است، [۲٫۲، ۲٫۵، ۲٫۷، ۳٫۰، ۳٫۳]، برای هر سطح ولتاژ مقدار جریان، زمان اجرا و توان مصرفی نشان داده شده که ستون اول نام وظیفه و عدد مربوط به سطح ولتاژ، ستون دوم سطح ولتاژ (V) اجرای وظیفه بر حسب ولت، ستون سوم جریان (I) وظیفه بر حسب آمپر، ستون چهارم زمان (T) مورد نیاز برای اجرای وظیفه بر حسب دقیقه و ستون پنجم میزان توان مصرفی (P) اجرای وظیفه بر حسب وات را نشان می‌دهد. از آنجا که دوره هر دو وظیفه

جدول ۱: خصوصیات وظایف.

وظیفه	زمان اجرا (min)	طول دوره (min)	جریان (A)	ولتاژ (V)	توان (W)
A	۶	۱۷	۰٫۰۵۵	۳٫۳	۰٫۱۸۱۵
B	۶	۱۷	۰٫۰۲۷۵	۳٫۳	۰٫۰۹۰۸

جدول ۲: تغییر پویای ولتاژ برای وظیفه A در ۵ سطح.

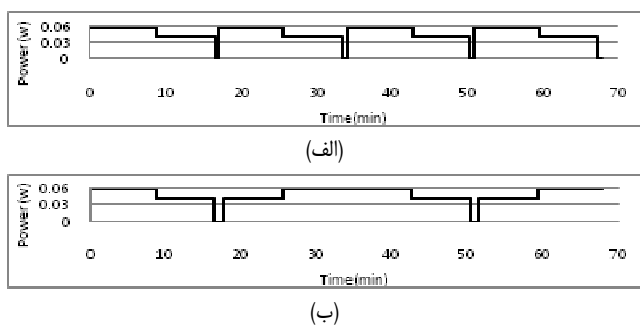
سطح ولتاژ	V (V)	I (A)	T (min)	P (W)
A1	۳٫۳	۰٫۰۵۵	۶	۰٫۱۸۱۵
A2	۳	۰٫۰۴۱۶	۶٫۷۵۲	۰٫۱۲۴۰
A3	۲٫۷	۰٫۰۳۰۱	۷٫۷۸۲	۰٫۰۸۱۳
A4	۲٫۵	۰٫۰۲۳۹	۸٫۶۱۹	۰٫۰۵۹۸
A5	۲٫۲	۰٫۰۱۶۳	۱۰٫۲۴۱	۰٫۰۳۵۹

جدول ۳: تغییر پویای ولتاژ برای وظیفه B در ۵ سطح.

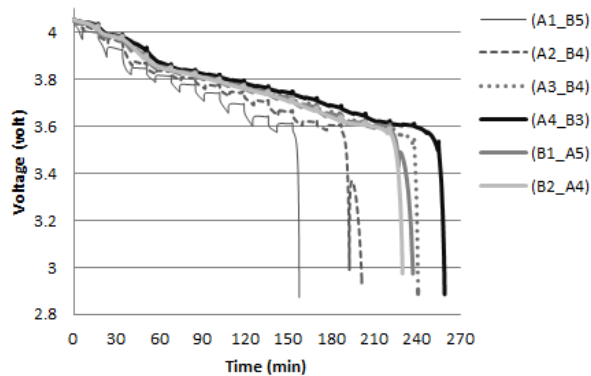
سطح ولتاژ	V (V)	I (A)	T (min)	P (W)
B1	۳٫۳	۰٫۰۲۷۵	۶	۰٫۰۹۰۸
B2	۳	۰٫۰۲۰۷	۶٫۷۵۲	۰٫۰۶۲۰
B3	۲٫۷	۰٫۰۱۵۱	۷٫۷۸۲	۰٫۰۴۰۷
B4	۲٫۵	۰٫۰۱۲۰	۸٫۶۱۹	۰٫۰۲۹۹
B5	۲٫۲	۰٫۰۰۸۱	۱۰٫۲۴۱	۰٫۰۱۷۹

صحیح نیست و طراحی بر مبنای این مدل ساده و حداقل کردن میانگین مصرف انرژی لزوماً منجر به بهینه‌شدن طول عمر باتری نمی‌شود. دسته دیگری از کارهایی که برای افزایش طول عمر باتری صورت گرفته، ارائه تکنیک‌های زمان‌بندی وظایف با در نظر گرفتن اثر نرخ دشارژ و بازیابی است. در کارهای اولیه‌ای که در زمینه زمان‌بندی آگاه از باتری صورت گرفت معمولاً محققان الگوریتم‌های افزایش (کاهش) ولتاژ را ارائه می‌دادند که تابع هزینه به دست آمده از مدل باتری را بهینه کنند [۲۶] و [۲۷]. در زمینه سیستم‌های بی‌درنگ سخت، در [۲۸] یک الگوریتم ایستای مبتنی بر توسعه الگوریتم ارائه‌شده در [۲۷] برای زمان‌بندی و در نظر گرفتن اثر بهبود، ارائه شده است.

اخیراً تلاش‌های زیادی برای استفاده از روش‌های ابتکاری که از مدل باتری به دست آمده، برای زمان‌بندی پویای وظایف دوره‌ای صورت گرفته است. مرجع [۲۹] یک الگوریتم زمان‌بندی پویا را ارائه می‌دهد که تلاش می‌کند تا حد امکان یک پروفایل جریان غیر افزایشی محلی^۱ برای گسترش طول عمر باتری را محفوظ نگه دارد. در [۳۰] با تصویر یک درک شهودی از این که چگونه روش‌های کشف‌کننده مدل‌های باتری می‌توانند عملاً در گسترش طول عمر باتری مؤثر باشند، فهم بهتری نسبت به آگاهی از وضعیت باتری ارائه می‌گردد. سپس یک فرم عمومی از مسأله زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری که برای زمان‌بندی وظایف دوره‌ای است در یک محیط تک‌پردازنده‌ای ارائه می‌دهد. در [۲۵] ابتدا مسأله زمان‌بندی وظایف برای سیستم‌های تک‌پردازنده‌ای مبتنی بر باتری با قابلیت اعمال تغییر پویای ولتاژ در قالب یک مسأله بهینه‌سازی غیر خطی مطرح می‌شود. سپس تابع هدف این مسأله که در واقع کمینه‌کردن شارژ مصرفی بر اساس تابع هزینه ارائه‌شده در [۱۵] برای یک گراف وظایف در زمان مشخص است مورد نظر قرار می‌گیرد. برای یک مجموعه



شکل ۲: نحوه چیدمان وظایف، (الف) چیدمان غیر افزایشی و (ب) چیدمان کاهشی- افزایشی.



شکل ۱: تأثیر تغییر پویای ولتاژ روی عملکرد باتری، نمودار ولتاژ- زمان به دست آمده از اجرای پروفایل‌های جدول ۴ در Dualfoil.

جدول ۵: جدول نتایج به دست آمده از اجرای پروفایل‌های جدول ۴ در DUALFOIL.

پروفایل	انرژی کل (W-h/kg)	ولتاژ کمینه (V)	زمان ولتاژ کمینه (min)	زمان اولین شکست (min)
A1-B5	۱۰۴٫۶	۲٫۸۷۴۱۳	۱۵۷٫۶۲۲	۱۵۷٫۶۲۲
A2-B4	۱۰۸٫۵۱	۲٫۹۳۵۸۷	۲۰۱٫۲۱۲	۱۹۲٫۵۹۳
A3-B4	۱۰۷٫۸۱	۲٫۸۸۵۲۵	۲۴۰٫۶۲۹	۲۴۰٫۶۲۹
A4-B3	۱۰۸٫۲۳	۲٫۸۸۴۶۲	۲۵۹٫۲۳۶	۲۵۹٫۲۳۶
B1-A5	۱۰۸٫۵۹	۲٫۹۷۳۶۶	۲۳۶٫۹۹۴	۲۳۶٫۹۹۴
B2-A4	۱۰۸٫۰۷	۲٫۹۷۳۳۸	۲۲۹٫۷۵۶	۲۲۹٫۷۵۶

جدول ۶: انرژی مصرفی اجرای ۸ دوره پروفایل‌های حاصل از ترکیب وظایف A و B.

پروفایل	انرژی مصرفی برای ۸ دوره بر اساس $E = IV.T(j)$
A1-B5	۶۱۰٫۷۱۰۷
A2-B4	۵۲۵٫۴۷۸۵
A3-B4	۴۲۷٫۳۸۴۷
A4-B3	۳۹۹٫۴۲۸۹
B1-A5	۴۳۷٫۹۷۶۷
B2-A4	۴۴۹٫۲۳۲۱

جدول ۷: نتایج حاصل از اجرای دو چیدمان مختلف پروفایل A4-B3 در DUALFOIL.

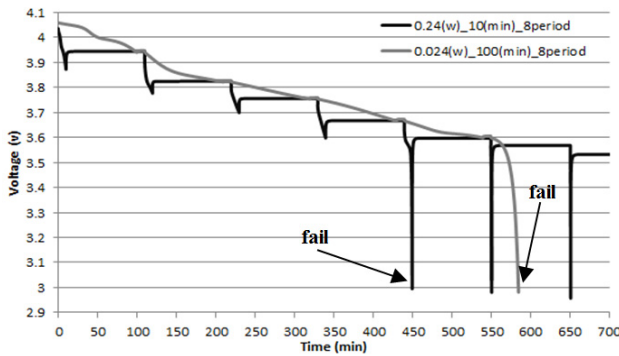
نوع اجرا	انرژی مصرفی کل (W-h/kg)	ولتاژ کمینه (V)	زمان ولتاژ کمینه (min)	زمان اولین شکست (min)
A4-B3 Dec-Inc	۱۰۸٫۶۸	۲٫۸۸۸۴۴	۲۶۳٫۱۰۶	۲۶۳٫۱۰۶
A4-B3 Non-Inc	۱۰۸٫۲۳	۲٫۸۸۴۶۲	۲۵۹٫۲۳۶	۲۵۹٫۲۳۶

برای مقایسه این پروفایل‌ها از شبیه‌ساز Dualfoil (توضیحات بیشتر در بخش ۳-۲ آمده) استفاده شده است. فرض بر این است که وظایف دوره‌ای هستند و طول دوره برابر موعدهای آن‌هاست. هر پروفایل را تا جایی که ولتاژ قطع به $3/2$ ولت برسد تکرار و اجرا شده است. در جدول ۵ و شکل ۱ نتایج به دست آمده از اجرای این پروفایل‌ها در Dualfoil آمده است. برای هر پروفایل، میزان انرژی مصرفی کل^۲ بر حسب وات ساعت به کیلوگرم (W-h/kg)، ولتاژ کمینه^۳ بر حسب ولت (V)، زمان رسیدن به ولتاژ حداقل^۴ بر حسب دقیقه (min) و زمان شکست سیستم^۵ بر حسب دقیقه در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین شکل ۱ نمایانگر نمودار تغییرات ولتاژ نسبت به زمان برای هر پروفایل است. همان گونه که

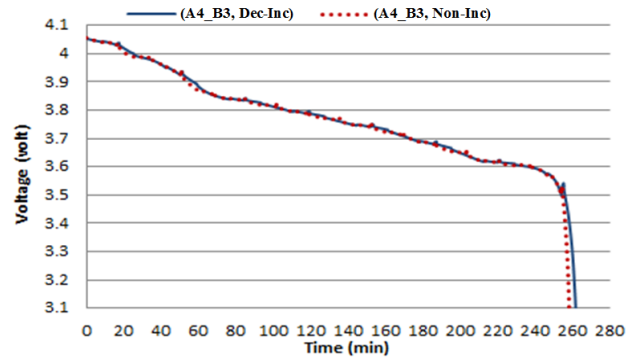
در جدول ۴ چند پروفایل مختلف برای اجرای این دو وظیفه در نظر گرفته شده به طوری که هیچ کدام موعدهای خود را از دست ندهند. مثلاً پروفایل اول که A1-B5 می‌باشد، به این صورت است که ابتدا وظیفه A با بالاترین ولتاژ، سطح اول (A1) و توان مصرفی ۰٫۱۸۱۵ وات به مدت ۶ دقیقه و سپس وظیفه B با سطح پنجم ولتاژ (B5) و توان مصرفی ۰٫۱۷۹ وات به مدت ۱۰٫۳۴۱ دقیقه اجرا می‌شود. طول زمان اجرای این دو وظیفه جمعاً ۱۶٫۳۴۱ دقیقه می‌شود. تا دقیقه ۱۷ که موعدهای دوره این دو وظیفه است، به اندازه ۰٫۷۵۹ دقیقه پردازنده بی‌کار است و توان مصرفی در این بازه صفر می‌باشد. ۵ پروفایل دیگر نیز به همین ترتیب هستند و البته باید توجه داشت که این ۶ پروفایل بهترین حالت‌ها از بین ۱۷ حالت ممکن هستند^۱.

- Total Energy
- Minimum Voltage
- Time of Minimum Voltage
- First Failed Time

۱. تعداد حالات کل برای زمانی که n وظیفه و L سطح ولتاژ داریم برابر با L^n می‌باشد و در اینجا ۲۵ است که از این ۲۵ حالت تعداد آنهایی که منجر به از دست رفتن موعدهای می‌شود، ۸ است.



شکل ۴: تأثیر توان روی عملکرد باتری، نمودار ولتاژ- زمان حاصل از اجرای دو الگوی دشارژ مختلف، توان مصرفی زیاد و توان مصرفی کم.



شکل ۳: تأثیر چیدمان وظایف روی عملکرد باتری، نمودار ولتاژ- زمان حاصل از اجرای دو چیدمان مختلف پروفایل A4_B3 در Dualfoil.

جدول ۸: مشخصات و نتایج حاصل از اجرای دو الگوی دشارژ مختلف، توان مصرفی زیاد و توان مصرفی کم.

شماره وظیفه	توان (W)	زمان اجرا (min)	دوره (min)	$E=I.V.T(j)$	انرژی مصرفی واقعی (j)	زمان شکست (min)
۱	۰.۲۴	۱۰	۱۱۰	۷۲۰	۷۲۲/۲۹۰	۴۵۰
۲	۰.۰۲۴	۱۰۰	۱۱۰	۷۷۰/۶۵۹	۷۲۲/۰۴	۵۸۵/۱۸

افزایشی^۲ را نسبت به مدل غیر افزایشی^۳ بیان می‌کنند. این مسأله در بسیاری از آزمایش‌های دیگر نیز مشاهده شده و بنابراین نمی‌توان گفت که همیشه چیدمان غیر افزایشی بهترین چیدمان است.

در اینجا با ذکر یک سناریوی دیگر، تأثیر توان مصرفی روی عملکرد باتری مشخص می‌شود. در اغلب کارهایی که مرتبط با زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری هستند، تمرکز روی کاهش هزینه طبق تابع هزینه ارائه شده در [۱۵] است. در این دسته از کارها علی‌رغم به کار بردن تکنیک تغییر پویای ولتاژ و کاهش ولتاژ و جریان وظایف، برای محاسبه هزینه از تابعی که فقط وابسته به جریان مصرفی است، استفاده می‌شود [۲۵] و [۲۶]. حال آن که بنا به گفته نویسندگان [۱۵] این تابع هزینه هنگامی که ولتاژ اجرای همه وظایف یکسان است کارایی دارد. البته در [۱۵] نحوه استفاده از این تابع، زمانی که وظایف با ولتاژهای متفاوت اجرا می‌شوند، مشخص شده است (برای توضیح تکمیلی به بخش ۳-۲ مراجعه شود). بدیهی است که هنگام تغییر ولتاژ و به دنبال آن تغییر جریان، توان مصرفی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

سناریوی دوم به بیان اهمیت توجه به تأثیر توان مصرفی روی عملکرد و میزان بهره‌وری باتری می‌پردازد (جدول ۸ و شکل ۴). در این سناریو دو وظیفه با انرژی مصرفی یکسان ($E=I \times V \times T=144j$) و توان متفاوت در نظر گرفته شده است. توان مصرفی وظیفه اول و دوم به ترتیب ۰.۲۴ و ۰.۰۲۴ وات، زمان اجرا ۱۰ و ۱۰۰ دقیقه و دوره هر دو وظیفه ۱۱۰ دقیقه است. این دو وظیفه را در دو پروفایل جداگانه تا لحظه شکست سیستم (زمانی که ولتاژ باتری به کمتر از ۳/۰ ولت برسد) به صورت دوره‌ای اجرا می‌کنیم. جدول ۸ نتایج حاصل از اجرای این وظایف را تا لحظه شکست سیستم نشان می‌دهد. همان گونه که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، زمانی که توان مصرفی کمتر باشد حتی اگر انرژی مصرفی یکسان باشد، طول عمر سیستم بیشتر است. لازم به ذکر است که میزان واقعی انرژی مصرفی همان specific energy به دست آمده از نتایج شبیه‌ساز Dualfoil است و انرژی مصرفی به صورت تئوری از حاصل ضرب جریان، ولتاژ و زمان به دست می‌آید ($E=I \times V \times T$). وظیفه با

مشاهده می‌گردد مقدار انرژی مصرفی کل تا لحظه شکست سیستم^۱ و زمان رسیدن به حداقل ولتاژ و زمان شکست در پروفایل A4-B3 بیشتر از بقیه پروفایل‌ها است. در واقع نتایج، بیانگر افزایش طول عمر سیستم و میزان انرژی مورد استفاده در پروفایل A4-B3 است. به این ترتیب از انرژی بیشتری برای اجرای وظایف استفاده شده و بهره‌وری از باتری افزایش یافته است.

جدول ۶ به درک بهتر این مسأله کمک می‌کند. در این جدول انرژی مصرفی در طول ۸ دوره بر اساس فرمول انرژی، بدون در نظر گرفتن سربار انرژی برای هر پروفایل محاسبه شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد پروفایل A4-B3 کمترین میزان انرژی مصرفی در مدت زمان ۱۳۶ دقیقه نسبت به پروفایل‌های دیگر را داشته است. این امر در نمودار شکل ۱ نیز قابل مشاهده است.

شیب نمودارهای مربوط به هر پروفایل می‌تواند تا حدی تعیین‌کننده وضعیت هر پروفایل باشد. از این آزمایش و آزمایش‌های مشابه می‌توان این استنباط را داشت که وقتی وظایف به صورت دوره‌ای هستند اگر برای یک ابردوره بهترین پروفایل ممکن را به دست آوریم، آن گاه می‌توان تضمین کرد که تکرار این پروفایل منجر به بهترین بهره‌وری از باتری می‌شود. البته باید این نکته را نیز در نظر داشت که نه تنها نحوه تغییر پویای ولتاژ، بلکه نحوه چیدمان وظایف نیز در بهره‌وری از باتری یک عامل مؤثر است. شایان ذکر است که در این آزمایش تمامی پروفایل‌ها به صورت غیر افزایشی و با توجه به دستاوردهای نویسندگان [۱۵] مرتب شده‌اند.

در ادامه با توجه به دوره‌ای بودن وظایف به جای چیدمان غیر افزایشی از ابتدای هر دوره، یک دوره وظایف را به صورت غیر افزایشی و دوره بعدی را به صورت افزایشی، پشت سر هم قرار می‌دهیم. در این حالت شکل چیدمان وظایف به صورت کاهشی-افزایشی تدریجی در می‌آید. شکل‌های ۲-الف و ۲-ب به ترتیب چیدمان غیر افزایشی و کاهشی-افزایشی پروفایل A4-B3 را نشان می‌دهند.

شکل ۳ و جدول ۷ نتایج حاصل از اجرای دو چیدمان کاهشی-افزایشی تدریجی و غیر افزایشی را نشان می‌دهند و برتری مدل کاهشی-

2. Dec-Inc

3. Non-Inc

۱. زمانی که ولتاژ باتری برای اولین بار کمتر از ۳/۲ ولت شود.



شکل ۵: استفاده از مبدل DC-DC جهت برآورده کردن توان مورد نیاز پردازنده [۱۵].

۰/۸ تا ۰/۹ است. اگر I_{proc} و V_{proc} به ترتیب جریان و ولتاژ پردازنده و I_{batt} و V_{batt} جریان و ولتاژ باتری باشند، ضریب سودمندی برابر است با [۲۵] و [۲۶]

$$\eta = \frac{I_{proc} V_{proc}}{I_{batt} V_{batt}} \quad (1)$$

اگر حداکثر ولتاژ پردازنده برای اجرای وظایف (ولتاژ اولیه) V_{dd} و ولتاژ جدید V_{new} باشد، آن گاه فاکتور s که تعیین‌کننده میزان تغییر ولتاژ هنگام اعمال تغییر پویای ولتاژ است به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۵] و [۲۶]

$$s = \frac{V_{dd}}{V_{new}} \quad (2)$$

اگر زمان اجرای وظیفه برابر e_k و ولتاژ آستانه V_t باشد، پس از تغییر ولتاژ به اندازه فاکتور s ، زمان اجرای جدید وظیفه، e_k^* ، از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۵] و [۲۶]

$$\frac{e_k^*}{e_k} = s \left[1 + \frac{2(s-1)}{V_{dd} - V_t} V_t \right] \quad (3)$$

همچنین اگر جریان اجرای وظیفه برابر I_k باشد، پس از تغییر ولتاژ به اندازه فاکتور s ، جریان اجرای جدید وظیفه، I_k^* ، از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۵] و [۲۶]

$$\frac{I_k^*}{I_k} = \frac{V_{new}^2}{V_{dd}^2} = \frac{1}{s^2} \quad (4)$$

شایان ذکر است که برای مقایسه‌پذیر بودن نتایج الگوریتم ارائه‌شده، تمام فرضیات فوق مطابق است با کارهای قبلی [۲۵] و [۲۶].

۳-۲ مدل باتری

در این مقاله از دو مدل باتری برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. مدل اول، مدل تحلیلی سطح بالای مبتنی بر شارژ مصرفی باتری است که Rakhmatove و دیگران در [۳]، [۱۷]، [۲۹] و [۳۱]، تحت عنوان مدل نفوذی ارائه دادند. در این مدل شارژ انتقال‌یافته از الکترولیته در طول زمان یک بار کاری محاسبه می‌شود. مدل نفوذی در مقایسه با مدلی که Peukert در [۲۶] ارائه داد از دقت بالایی برخوردار است. در این مدل ارتباط تحلیلی بین جریان، زمان تخلیه باتری و شارژ از دست رفته هنگام تخلیه باتری مشخص شده است. اگر در بازه‌های زمانی τ شدت جریان تخلیه $i(\tau)$ باشد، شارژ ظاهری از دست رفته در بازه زمانی $[0, L]$ طبق این مدل به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۱]

$$\alpha = \underbrace{\int_0^L i(\tau) d\tau}_{l(t)} + \underbrace{\int_0^L i(\tau) \left(\sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta^m m^2 (L-\tau)} \right) d\tau}_{u(t)} \quad (5)$$

در حالی که L طول عمر باتری و α و β پارامترهای باتری هستند. طبق (۵) شارژ ظاهری از دست رفته شامل دو قسمت است: میزان شارژی

توان مصرفی کمتر، ۷٪ بهره‌وری باتری و ۳۰٪ طول عمر سیستم را افزایش می‌دهد که هر دو مقادیر قابل توجهی هستند. با نگاهی دقیق‌تر به نمودار شکل ۴ در می‌یابیم که معمولاً یک افت ولتاژ در ابتدای اجرای هر دوره از وظایف وجود دارد. افت ولتاژ هنگام اجرای وظیفه با توان مصرفی بالا بسیار زیاد است و این مسأله به وضوح دیده می‌شود.

بدیهی است که شکست سیستم اصولاً در یکی از این نقاط افت ولتاژ رخ دهد مگر این که انرژی ذخیره‌شده در باتری، قبل از رسیدن به این نقاط، تمام شود. از این آزمایش و آزمایش‌های مشابه این نتیجه به دست می‌آید که اگر در سیستم مجموعه‌ای از وظایف دوره‌ای اجرا شوند، عمدتاً سیستم هنگام اجرای وظیفه با توان مصرفی بالاتر، دچار شکست می‌شود زیرا افت ولتاژ در این نقاط شدیدتر بوده و در طول هر ابردوره ولتاژ کمینه مربوط به زمان اجرای این وظایف است. این مسأله از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است اما در بسیاری از کارهای قبلی نادیده گرفته شده است. در اغلب کارهای پیشین عموماً تمرکز روی مقدار ولتاژ در انتهای دوره یا ابردوره بوده است در صورتی که ممکن است سیستم قبل از رسیدن به انتهای پروفایل به دلیل یک افت ولتاژ شدید، دچار شکست شود.

در اینجا به یادآوری چند نکته اساسی در جهت افزایش بهره‌وری از باتری می‌پردازیم. در زمان‌بندی‌های غیر آگاه از وضعیت باتری برای افزایش طول عمر باتری و به دنبال آن افزایش طول عمر سیستم، اغلب از روش‌های کمینه‌کردن انرژی مصرفی استفاده می‌شود، حال آن که کمینه‌کردن انرژی متضمن بهره‌وری بهینه از باتری نیست و طول عمر سیستم بیشینه نمی‌شود [۱۵]، [۲۲]، [۲۵] و [۲۶]. به همین دلیل استفاده از روش‌های مبتنی بر رفتار باتری بسیار ضروری است. در [۲۶] نویسندگان با اشاره به چند نکته اصلی در ارتباط با رفتار باتری در شرایط مختلف، متذکر می‌شوند که نحوه چیدمان وظایف در عملکرد باتری تأثیر بسزایی دارد اما آنها چیدمان وظایف را فقط برای یک ابردوره یا دوره در نظر گرفته‌اند، در صورتی که سناریوی دوم مشخص می‌کند بهترین چیدمان برای یک ابردوره، ضامن بهترین بهره‌وری در طول کل زمان اجرا نیست. در همه سناریوهای فوق یک عامل مهم به صورت مشترک وجود دارد که تأثیر زیادی بر عملکرد باتری و بهبود بهره‌وری آن دارد. این عامل میزان توان مصرفی وظایف است. بنابراین در این مقاله تمرکز ما روی توان مصرفی وظایف است و به ارائه یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری می‌پردازیم که در آن مقدار توان مصرفی وظایف نقشی اساسی در تصمیم‌گیری‌ها برای اعمال تکنیک تغییر پویای ولتاژ ایفا می‌کند. بر خلاف روش‌های ابتکاری پیشین [۲۵] و [۲۶] که عمدتاً تمرکز آنها بر کمینه‌کردن هزینه طبق تابع هزینه ارائه‌شده در [۱۵] و میزان انرژی مصرفی است، در این روش تمرکز اصلی روی هم‌سطح سازی توان مصرفی است.

۳-۳ مدل سیستم و تعریف مسأله

در این بخش به توضیح مدل سیستم و تعریف مسأله می‌پردازیم.

۳-۱ مدل سیستم

سیستم شامل یک پردازنده با قابلیت تغییر پویای ولتاژ و یک باتری جهت تأمین انرژی مورد نیاز پردازنده است. باتری توان مورد نیاز پردازنده را از طریق یک مبدل DC-DC برای پردازنده فراهم می‌کند (شکل ۵). مبدل DC-DC یک ضریب سودمندی^۱ دارد که معمولاً عددی بین

۱. حداقل ولتاژ مورد نیاز برای شروع هدایت الکتریکی

1. Efficiency

شبهه‌ساز برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌شود. برای هر پروفایل ورودی، Dualfoil مقادیر بسیار دقیقی از ولتاژ باتری بر حسب تابعی از زمان در قالب یک فایل خروجی ارائه می‌کند و به دلیل دقت این شبهه‌ساز نتایج آن به عنوان مقادیر مرجع استفاده می‌شوند. در [۱۵] نویسندگان نتایج حاصل از مدل نفوذی (ریزشی) خود را با نتایج حاصل از شبهه‌ساز سطح پایین Dualfoil مقایسه کرده‌اند. برای جریان پیوسته ثابت، مدل نفوذی طول عمر باتری را با میانگین ۳٪ خطا محاسبه می‌کند و حداکثر خطا در مقایسه با مقادیر به دست آمده از برنامه Dualfoil، ۶٪ است. برای جریان متغیر و دارای وقفه در آزمایش‌ها، مدل نفوذی بهتر عمل می‌کند و حداکثر خطای آن ۲٫۷٪ و میانگین خطا کمتر از ۱٪ است. بنابراین در این مقاله ما نیز از این مدل برای ارزیابی الگوریتم‌ها استفاده می‌کنیم.

مقادیری که برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و مقایسه با الگوریتم‌های قبلی، [۲۵] و [۲۶]، مد نظر هستند عبارتند از شارژ مصرفی باتری در انتهای پروفایل، ولتاژ کمینه باتری در طول زمان پروفایل، ولتاژ باتری در انتهای پروفایل و درصد افت ولتاژ نسبت به ولتاژ مدار باز. حداقل ولتاژ و ولتاژ نهایی و انرژی مصرفی از فایل خروجی حاصل از اجرای Dualfoil استخراج می‌شوند. درصد افت ولتاژ نسبت به ولتاژ مدار باز طبق (۹) محاسبه می‌شود

$$V_{drop} = \frac{V_{oc} - V_{batt}}{V_{oc} - V_{cut}} \quad (9)$$

که V_{oc} ولتاژ مدار باز و V_{cut} ولتاژ قطع است.

۳-۳ مدل وظیفه

یک وظیفه k با ۴ پارامتر مشخص می‌شود: جریان I_k ، مدت زمان اجرای e_k ، زمان رسیدن t_k و موعد نسبی d_k . برای هر وظیفه دوره‌ای طول دوره، p_k ، با موعد نسبی آن وظیفه برابر است و همچنین ولتاژ اولیه مورد نیاز برای اجرای هر وظیفه، $V_{k,proc}$ ، با حداکثر ولتاژ پردازنده برابر است.

۳-۴ تابع هزینه

برای باتری یک پروفایل تخلیه عبارت است از مجموعه‌ای از عناصر که با ۵ پارامتر به صورت $(T, t_k, t_k + \Delta_k, I_k, \beta)$ نشان داده می‌شود که t_k زمان شروع، Δ_k طول زمان و I_k جریان k امین عنصر می‌باشد و T طول کل زمان پروفایل و β پارامتر باتری مورد نظر است. اگر تعداد عناصر این مجموعه n باشد، آن گاه طول زمان پروفایل با زمان اتمام آخرین عنصر مجموعه برابر است $(T = t_{n-1} + \Delta_{n-1})$. تابع هزینه که میزان شارژ ظاهری تا T زمان را به دست می‌آورد به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۶]

$$\partial = \sum_{k=1}^{n-1} F(T, t_k, t_k + \Delta_k, I_k, \beta) \quad (10)$$

که

$$F(T, t_k, t_k + \Delta_k, I_k, \beta) = \begin{cases} I_k \Delta_k + 2I_k \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta^m m^x (T-t_k - \Delta_k)} - e^{-\beta^m m^x (T-t_k)}}{\beta^m m^x}, & I \neq 0 \\ -2I_{k-1} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta^m m^x (T-t_k + \Delta_k)} (e^{-\beta^m m^x (T-t_{k-1} - \Delta_{k-1})} - e^{-\beta^m m^x (T-t_{k-1})})}{\beta^m m^x}, & I = 0 \end{cases} \quad (11)$$

که به خاطر جریان اعمال شده از دست رفته است $(I(t))$ و میزان شارژ غیر قابل دسترسی $(u(t))$. بخش اول توسط دستگاه مصرف شده و بخش دوم میزان شارژی است که به صورت غیر قابل استفاده در باتری باقی مانده است. هرگاه میزان شارژ از دست رفته ظاهری باتری با ظرفیت باتری برابر شود، باتری خالی است. برای جریان تخلیه ثابت $(i(t) = I)$ ، $u(t)$ به صورت زیر است [۳۱]

$$u(t) = 2I \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\beta^m m^x (L-t)}}{\beta^m m^x} \quad (6)$$

در طول بازه‌های بیکاری، میزان شارژ غیر قابل دسترس کاهش خواهد یافت و برای استفاده مجدد، قابل دسترس خواهد شد. تابع توصیف‌کننده کاهش مقدار شارژ غیر قابل دسترس در زمان بیکاری t_i ، بعد از تخلیه با جریان ثابت I ، به مدت زمان t_i به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۱]

$$u(t_i) = 2I \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta^m m^x t_i} (1 - e^{-\beta^m m^x t_i})}{\beta^m m^x} \quad (7)$$

که α عددی ثابت و معادل ظرفیت کل باتری بر حسب واحد شارژ (coulombs) است. همچنین β^x مربوط به نرخ نفوذ درون باتری، عامل اصلی در رفتار غیر خطی باتری در روند تخلیه می‌باشد. هرچه میزان این پارامتر بیشتر باشد نمایانگر بهبود باتری است و اگر این مقدار به حدی بزرگ باشد که به بینهایت میل کند، آن گاه باتری به صورت یک منبع انرژی/توان ایده‌آل عمل خواهد کرد. با افزایش مقدار m در بخش دوم (۶)، مقدار حاصل از سری خیلی کم افزایش می‌یابد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند اعمال m تا عدد ۱۰ برای پیش‌بینی صحیح طول عمر باتری کفایت می‌کند [۳] و [۲۶].

همان طور که مشاهده می‌شود، (۵) تا (۷) همگی بر مبنای جریان هستند و این روابط زمانی که ولتاژ اجرای وظایف یکسان است، کاربرد دارند [۱۵]. در شرایطی که از تکنیک تغییر پویای ولتاژ در سیستم استفاده می‌شود، باید ابتدا میانگین ولتاژ سیستم (V_{avg}) را به دست آورد و سپس جریان را با استفاده از (۸) برای هر وظیفه محاسبه نمود

$$I = \frac{P}{V_{avg}} \quad (8)$$

که P توان مصرفی هر وظیفه است و از حاصل ضرب ولتاژ و جریان نهایی تنظیم‌شده برای وظیفه به دست می‌آید. جریان حاصل را جهت محاسبه شارژ ظاهری در روابط فوق قرار می‌دهیم [۱۵].

مدل دوم یک مدل الکتروشیمیایی است که بر اساس فرایندهای شیمیایی درون باتری به وجود آمده است. Doyle و دیگران در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ یک مدل الکتروشیمیایی را برای باتری‌های لیتیوم-یون طراحی کردند [۵] تا [۷] که این مدل از حل ۶ جفت معادله دیفرانسیل غیر خطی به دست آمده و نتیجه حل این معادلات ولتاژ و جریان به صورت تابعی از زمان است. Doyle با استفاده از برنامه فرترن این مدل را برای باتری‌های لیتیوم-یون شبهه‌سازی کرد که این شبهه‌ساز سطح پایین Dualfoil نام دارد که به صورت رایگان در دسترس قرار دارد [۲۷]. در این مقاله علاوه بر تابع هزینه به دست آمده از مدل نفوذی، از این

موعدشان مرتب و زمان‌بندی می‌کنیم. اگر تعداد کل وظایف n باشد، پیچیدگی زمانی این الگوریتم $O(n^2)$ است.

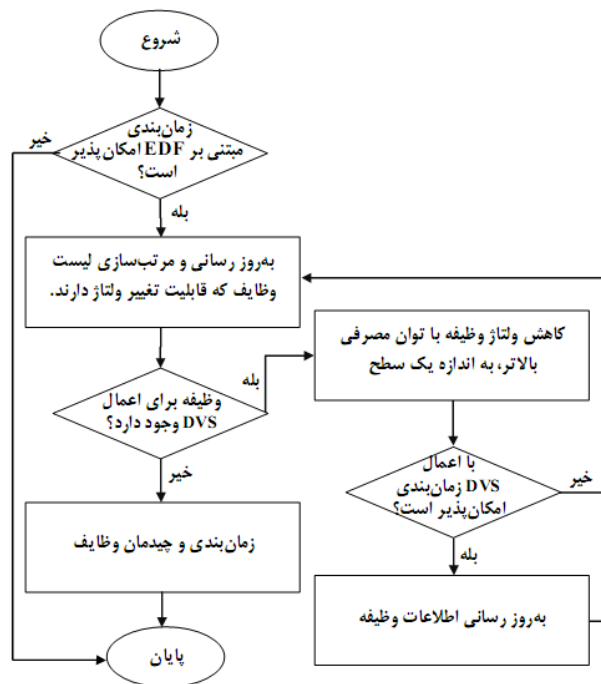
گام دوم: از تکنیک تغییر پویای ولتاژ، جهت بهره‌گیری از زمان‌های بیکاری^۵ پردازنده استفاده می‌کنیم. این تکنیک مبنی بر این خصوصیت باتری است که با کاهش هرچه بیشتر سرعت/ولتاژ وظیفه، هزینه پروفایل کمتر می‌شود [۲۶]. با اعمال تغییر پویای ولتاژ علاوه بر کاهش انرژی و هزینه، توان مصرفی نیز کاهش می‌یابد. برخلاف روش‌های پیشین که تمرکز روی انرژی یا هزینه بود، در اینجا تمرکز اصلی روی توان مصرفی است. در الگوریتم پیشنهادی از تکنیک تغییر پویای ولتاژ در جهت کاهش توان مصرفی وظایف با هدف افزایش بهره‌وری باتری استفاده می‌شود. بدین صورت که در هر مرحله یک وظیفه را انتخاب و به اندازه یک سطح، ولتاژ آن را کاهش می‌دهیم. یکی از مسایل اساسی هنگام استفاده از تکنیک تغییر پویای ولتاژ در جهت افزایش بهره‌وری باتری، نحوه انتخاب وظیفه جهت اعمال تغییر پویای ولتاژ است. همان‌طور که در قسمت انگیزه تحقیق گفته شد توان مصرفی نقش بسزایی در رفتار باتری ایفا می‌کند، لذا در الگوریتم پیشنهادی هنگام انتخاب یک وظیفه جهت اعمال تغییر پویای ولتاژ به اندازه یک سطح، وظیفه‌ای که توان مصرفی بیشتری دارد را انتخاب می‌کنیم و امکان‌پذیر بودن زمان‌بندی در صورت کاهش ولتاژ این وظیفه به اندازه یک سطح را مورد بررسی قرار می‌دهیم. اگر این امر امکان‌پذیر باشد، آن‌گاه تغییر ولتاژ را اعمال می‌کنیم و زمان‌بندی را با در نظر گرفتن ولتاژ، جریان و زمان اجرای جدید این وظیفه انجام می‌دهیم. این گام را تا زمانی که امکان کاهش ولتاژ هیچ وظیفه‌ای نباشد، تکرار می‌کنیم. با استفاده از این روش در واقع عمل هم‌سطح سازی توان مصرفی تا حد ممکن صورت می‌گیرد. هم‌سطح شدن توان مصرفی چند مزیت دارد: اول این که حداکثر توان مصرفی تا جایی که امکان دارد کاهش می‌یابد و به دنبال آن از افت شدید ولتاژ ناشی از توان مصرفی بالا کاسته می‌شود. این امر طبق سناریوی اول و دوم کارایی باتری را به خصوص زمانی که وظایفی با توان مصرفی زیاد و مدت زمان اجرای کم داریم، بهبود می‌بخشد. دوم این که به دنبال هم‌سطح شدن توان مصرفی وظایف، سربار ناشی از تغییر سطح ولتاژ/سرعت پردازنده کمتر می‌شود [۳۲] که البته در این مقاله به دلیل مطابقت با کارهای قبلی از محاسبه سربار انرژی صرف نظر شده است. اگر تعداد وظایف n و تعداد سطوح ولتاژ m باشد، پیچیدگی زمانی این گام $O(mn^2)$ است.

گام سوم: پس از اعمال تغییر پویای ولتاژ وظایف بر اساس توان مصرفی تا جایی که دیگر امکان کاهش ولتاژ هیچ وظیفه‌ای نباشد، وظایف را زمان‌بندی کرده و سعی می‌کنیم تمامی وظایف را تا جایی که امکان دارد به صورت غیر افزایشی مرتب کنیم. این بخش از الگوریتم مشابه الگوریتم ارائه شده در [۲۵] می‌باشد و پیچیدگی زمانی این گام $O(n^2)$ است. شکل ۶ روند الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۵- نتایج آزمایش‌ها

در این مقاله برای انجام آزمایش‌ها پارامترهای سیستم را همانند مقاله‌های قبلی تنظیم کرده‌ایم [۲۵] و [۲۶]. پردازنده قابلیت تغییر

5. Slack Times



شکل ۶: روند الگوریتم پیشنهادی (هم‌سطح‌سازی توان مصرفی).

۳-۵ تعریف مسأله

با توجه به پارامترهای مربوط به باتری، $(\alpha$ و $\beta)$ ، به عنوان منبع انرژی و پارامترهای وظایف (زمان رسیدن، طول زمان اجرا، موعد نسبی و جریان وظیفه) می‌خواهیم با استفاده از تکنیک تغییر پویای ولتاژ وظایف را طوری زمان‌بندی کنیم که محدودیت‌های آنها ارضا شوند (به عنوان مثال قبل از رسیدن موعد^۱ وظیفه اجرایش پایان یابد)، طول عمر سیستم (مدت زمانی که طول می‌کشد تا سیستم دچار شکست شود) را به حداکثر مقدار ممکن برسانیم و بیشترین بهره را از باتری ببریم. به عبارت دیگر می‌خواهیم θ را در هر بازه زمانی به حداقل میزان خود و به دنبال آن طول عمر سیستم را به حداکثر مقدار خود برسانیم. در ادامه به شرح الگوریتم زمان‌بندی انحصاری آگاه از وضعیت باتری برای وظایف دوره‌ای و غیر دوره‌ای می‌پردازیم.

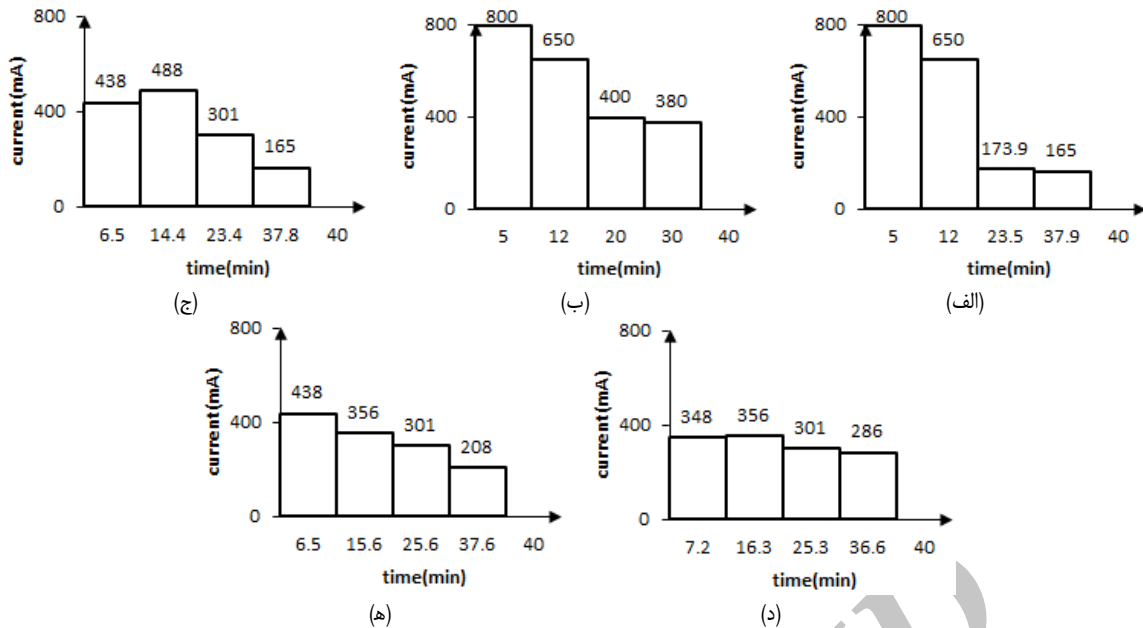
۴- الگوریتم زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری

در این مقاله وظایف به صورت دوره‌ای در نظر گرفته شده‌اند. برای زمان‌بندی وظایف دوره‌ای طبق الگوریتم پیشنهادی، ابتدا برای یک ابردوره^۲ وظایف را زمان‌بندی می‌کنیم، سپس زمان‌بندی به دست آمده را برای دیگر ابردوره‌ها تکرار می‌کنیم. یک ابردوره با کوچک‌ترین مضرب مشترک دوره همه وظایف برابر است.

الگوریتم پیشنهادی (هم‌سطح‌سازی توان مصرفی)^۳: الگوریتم زمان‌بندی پیشنهادی در ۳ گام به شرح زیر ارائه می‌گردد:

گام اول: یک زمان‌بندی با استفاده از الگوریتم انحصاری زودترین موعد اول^۴ (EDF) به دست می‌آوریم و در این مرحله، ولتاژ همه وظایف برابر با حداکثر ولتاژ پردازنده در نظر گرفته می‌شود. ابتدا وظایف را طبق روش زمان‌بندی زودترین موعد اول بر اساس

1. Deadline
2. Hyper Period
3. Power Leveling
4. Earliest Deadline First



شکل ۷: پروفایل‌های متفاوت حاصل از الگوریتم‌های مختلف زمان‌بندی وظایف جدول ۹، الف) غیر افزایشی و کاهش ولتاژ انحصاری، ب) بالاترین ولتاژ، ج) راه حل بهینه، د) هزینه نسبت به زمان و ه) الگوریتم پیشنهادی (هم‌سطح سازی توان مصرفی).

جدول ۹: خصوصیات اولیه وظایف.

شماره وظیفه	مدت زمان (min)	موعد (min)	جریان (mA)
۱	۷	۱۸	۸۰۰
۲	۵	۱۰	۶۵۰
۳	۸	۲۶	۴۰۰
۴	۱۰	۳۸	۳۸۰

۵ پروفایل متفاوت حاصل از الگوریتم‌های زمان‌بندی مختلف را نشان می‌دهد. برای مقایسه این ۵ پروفایل نه تنها از تابع هزینه بلکه از Dualfoil نیز استفاده شده است. در جدول ۱۰ نتایج حاصل از تابع هزینه به دو صورت محاسبه شده‌اند، یکی با در نظر گرفتن توان مصرفی و به دست آوردن جریان از روی توان مصرفی و ولتاژ میانگین، دیگری مشابه کارهای قبلی، بدون در نظر گرفتن توان مصرفی. در نمودار شکل ۸ نتایج حاصل از اجرای Dualfoil برای هر کدام از پروفایل‌ها آمده است.

در شکل ۷-الف وظایف بر اساس الگوریتم زمان‌بندی EDF بدون اعمال تغییر پویای ولتاژ و در بالاترین حد ولتاژ اجرا شده‌اند. با توجه به جدول ۱۰ این پروفایل بدترین نتیجه را در بین ۵ پروفایل موجود در شکل ۷ نشان می‌دهد. شکل ۷-ب نمایانگر پروفایل حاصل از الگوریتم مبنی بر چیدمان غیر افزایشی و کاهش ولتاژ انحصاری [۲۶] است. هزینه حاصل از این پروفایل نسبت به پروفایل شکل ۷-الف بهتر است اما نسبت به ۳ مورد دیگر بدتر است. شکل ۷-ج پروفایل حاصل از الگوریتم مبنی بر کاهش هزینه نسبت به زمان [۲۵] را نشان می‌دهد که این پروفایل، هزینه را نسبت به دو حالت شکل ۷-الف و شکل ۷-ب به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد اما نسبت به حالت بهینه، شکل ۷-د هزینه بیشتری مصرف می‌کند و همچنین هزینه آن از الگوریتم پیشنهادی نیز بیشتر است. در شکل ۷-ه پروفایل حاصل از الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. نتایج حاصل از اعمال تابع هزینه برای این پروفایل بهتر از پروفایل‌های شکل ۷-الف تا شکل ۷-ج است. هزینه این پروفایل ۲/۰۴٪ بهتر از پروفایل شکل ۷-ج و ۱/۷۱٪ بدتر از پروفایل شکل ۷-د است. جدول ۱۰ مقادیر حاصل از تابع هزینه را برای ۵ پروفایل فوق نشان می‌دهد و هزینه‌ها بر حسب میلی‌آمپر دقیقه (mA-min) است. شکل ۹ نمایانگر نمودار حاصل از نتایج به دست آمده برای هر پروفایل از طریق Dualfoil است.

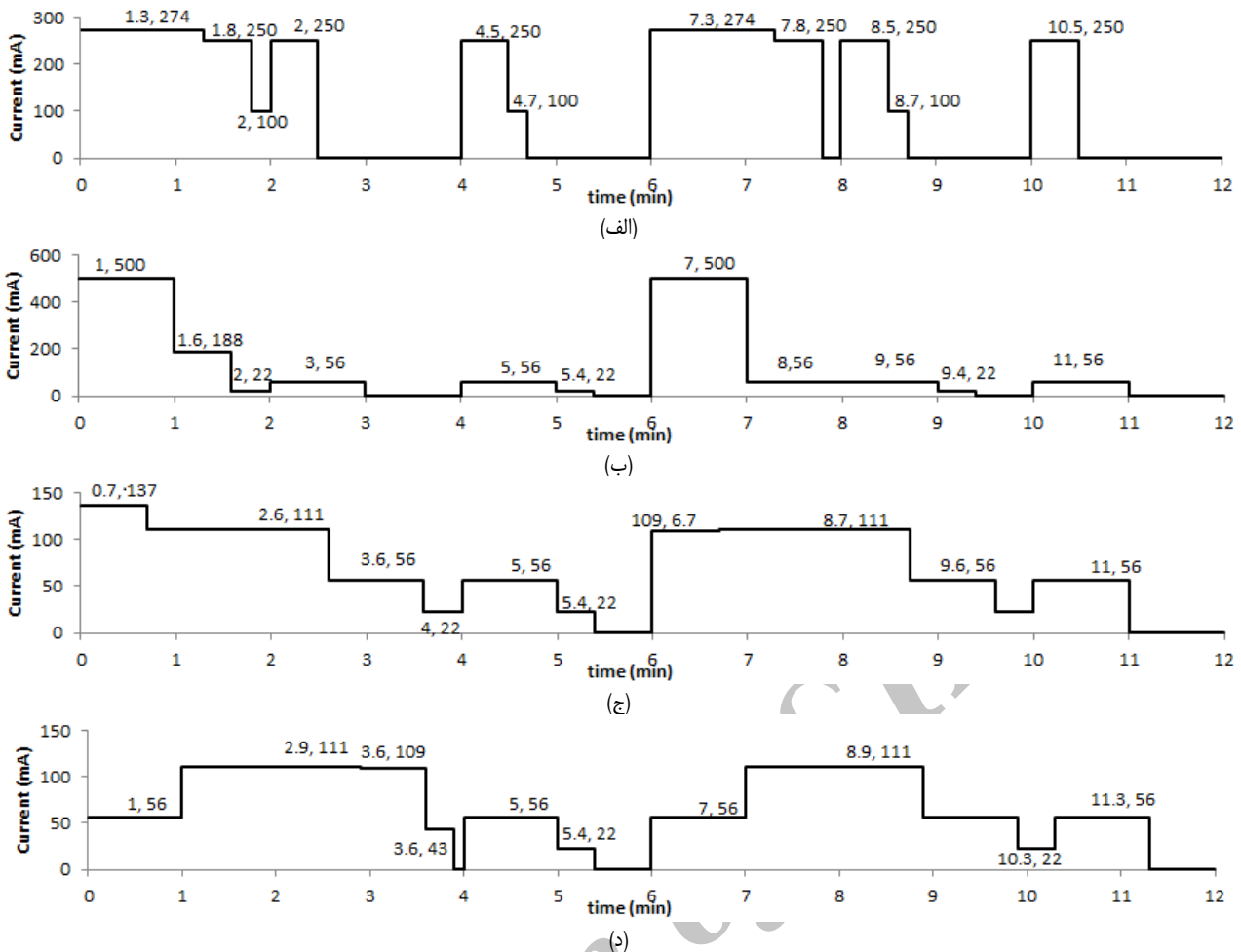
همان گونه که مشاهده می‌گردد، حداقل ولتاژ و ولتاژ نهایی پروفایل مربوط به الگوریتم پیشنهادی بیشتر از دیگر پروفایل‌ها است. در واقع در

سرعت/ولتاژ در ۵ سطح ولتاژ [۲.۰، ۲.۵، ۲.۷، ۳.۰، ۳.۳] را دارد. ولتاژ آستانه ۰/۴ ولت و ضریب سودمندی مبدل DC-DC ۱ است. همچنین پارامترهای باتری بر اساس باتری لیتیوم یون مورد استفاده در Dualfoil تنظیم شده است. این تنظیمات بدین صورت هستند: ولتاژ مدار باز^۱ $V_{oc} = 4.3V$ ، ولتاژ قطع $V_{cut} = 3.2V$ ، $\alpha = 4.375 mA - min$ ، $\beta = 0.273 min^{-1}$ و $m = 10$. لازم به ذکر است که در اغلب سیستم‌های نهفته مدرن مصرف انرژی پویا^۲ بسیار حائز اهمیت است. بنابراین در این مقاله مانند کارهای مشابه قبلی از انرژی مصرفی ایستا^۳ صرف نظر شده است. همچنین جهت ساده‌سازی، مقدار سربار زمان و انرژی مصرفی آن صفر در نظر گرفته شده است.

برای این که بتوانیم الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم‌های قبلی مقایسه کنیم، ابتدا چند نمونه از مثال‌های ارائه شده در کارهای قبلی را مد نظر قرار داده و الگوریتم پیشنهادی را روی آنها اعمال نموده‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در این مثال‌ها بهتر عمل می‌کند. در مرحله بعد آزمایش‌های گسترده‌تری انجام داده‌ایم و الگوریتم ارائه شده توسط Yokoyama و دیگران [۲۵] را نیز پیاده‌سازی کردیم و برای تعداد زیادی از آزمایش‌ها به مقایسه عملکرد دو الگوریتم و ارزیابی نتایج با استفاده از شبیه‌ساز Dualfoil و تابع هزینه تعریف شده در مدل نفوذی باتری پرداختیم. در ادامه مثال‌ها و نتایج به دست آمده شرح داده می‌شود. جدول ۹ نشان‌دهنده مشخصات ۴ وظیفه غیر دوره‌ای است و شکل ۷،

1. Open Circuit Voltage
2. Dynamic Energy Consumption
3. Static Energy Consumption

4. Non-Increasing and Exclusive down Scaling
5. Cost-Time



شکل ۸: پروفایل‌های حاصل از سه الگوریتم زمان‌بندی مختلف برای وظایف جدول ۱۱، (الف) پروفایل هم‌سطح‌سازی جریان، (ب) پروفایل غیر افزایشی، (ج) پروفایل کاهش هزینه نسبت به زمان و (د) پروفایل الگوریتم پیشنهادی (هم‌سطح‌سازی توان مصرفی).

جدول ۱۰: هزینه ۵ پروفایل شکل ۸.

ه	د	ج	ب	الف	پروفایل (mA-min)∅
۱۹۷۸۱,۵	۱۹۴۴۹,۱	۲۰۱۸۵,۶	۲۰۵۰۱,۷	۲۱۵۹۵,۴	∅ بر اساس جریان
۱۹۵۷۷,۶	۱۹۲۴۵,۵	۲۰۲۰۶,۳	۲۰۳۳۰,۱	۲۱۲۷۹,۹	∅ بر اساس توان

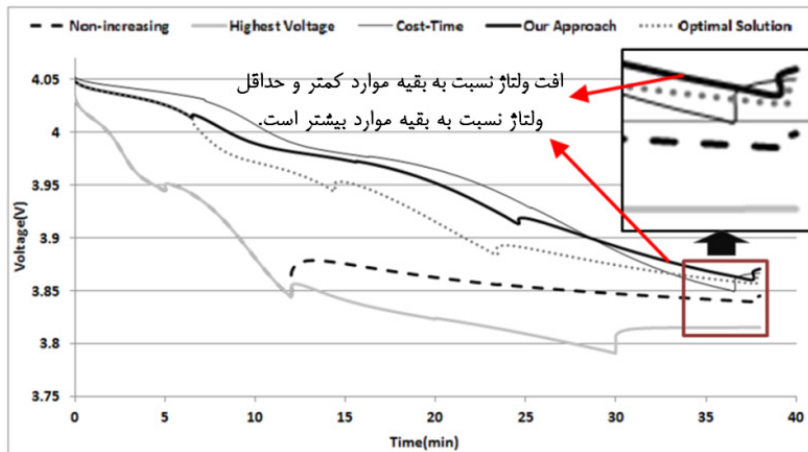
جدول ۱۱: خصوصیات اولیه وظایف دوره‌ای.

شماره وظیفه	زمان اجرا (min)	موعد (min)	جریان (mA)
۱	۰,۵	۲	۲۵۰
۲	۰,۲	۴	۱۰۰
۳	۱,۰	۶	۵۰۰

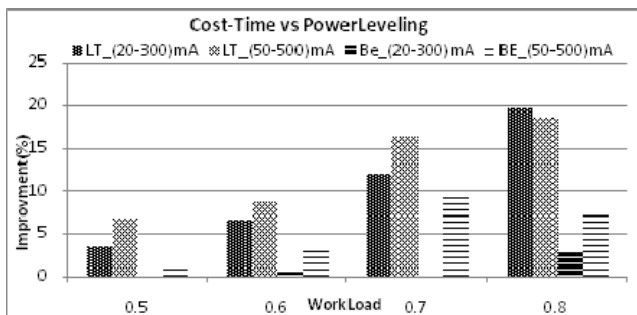
دست می‌آورد زیرا عملکرد باتری به موارد متعددی مانند انرژی مصرفی، چیدمان وظایف و ... بستگی دارد.

در ادامه به مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌ها هنگامی که وظایف دوره‌ای هستند، می‌پردازیم. ابتدا مثالی را که در کارهای قبلی آمده مد نظر قرار داده و الگوریتم پیشنهادی را روی آن اعمال می‌کنیم. جدول ۱۱ خصوصیات وظایف دوره‌ای این مثال را نشان می‌دهد. شکل ۸-الف پروفایل حاصل از الگوریتم هم‌سطح‌سازی جریان مصرفی [۲۶]، شکل ۸-ب پروفایل به دست آمده از الگوریتم غیر افزایشی [۲۶]، شکل ۸-ج پروفایل حاصل از الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان [۲۵] و شکل ۸-د پروفایل به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در جدول ۱۲ هزینه‌های هر کدام از پروفایل‌ها ذکر شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از پروفایل الگوریتم پیشنهادی بهتر از حالت‌های دیگر است. هزینه محاسبه شده هم بدون در نظر گرفتن توان مصرفی و هم با در نظر گرفتن توان مصرفی کمتر از دیگر حالت‌ها است.

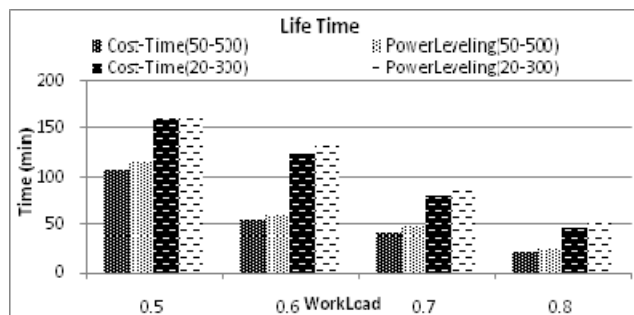
این پروفایل میزان افت ولتاژ هم در نقطه کمینه و هم در انتهای پروفایل از دیگر حالت‌ها کمتر است و در نهایت منجر به بهره‌وری بهتر از باتری و افزایش طول عمر باتری و سیستم می‌شود. لازم به ذکر است که پروفایل نشان داده شده در شکل ۷-د کمترین هزینه را دارد در حالی که نتایج حاصل از اجرای شبیه‌ساز دقیق dualfoil بیانگر این هستند که پروفایل به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی بهترین نتیجه را می‌دهد. علت این امر خطای مدل نفوذی و در پی آن هزینه برآورد شده نسبت به مدل الکتروشیمیایی است، بنابراین همان طور که نتایج نشان می‌دهند، الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان بهتر عمل می‌کند، البته نمی‌توان ادعا کرد که الگوریتم پیشنهادی جواب بهینه را به



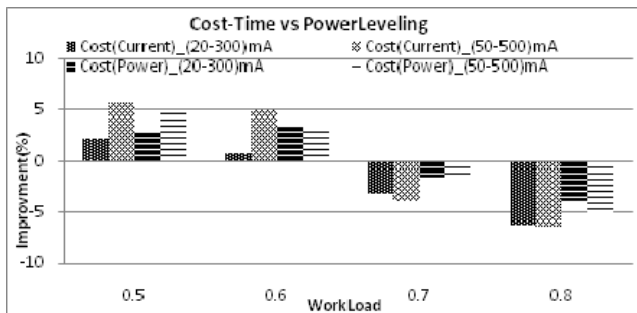
شکل ۹: نمودار ولتاژ- زمان ۵ پروفایل شکل ۷.



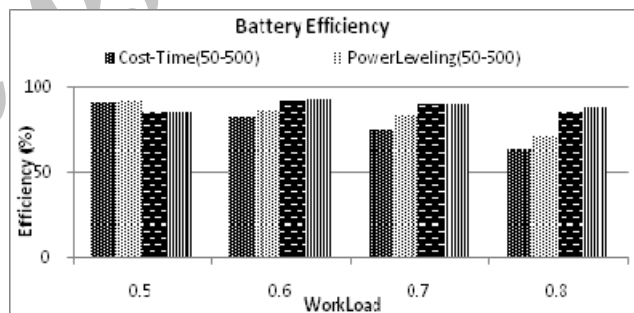
شکل ۱۲: مقایسه میزان طول عمر سیستم و بازده باتری الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان.



شکل ۱۰: مقایسه طول عمر سیستم در الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان.



شکل ۱۳: مقایسه هزینه یک ابردوره الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان.



شکل ۱۱: مقایسه بازده باتری در الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان.

آزمایش‌های این بخش را برای زمانی که بار کاری بین ۰/۵ تا ۰/۸ است انجام شده و برای هر بار کاری ۲۵ مجموعه مجزا شامل ۶ وظیفه دوره‌ای ایجاد شده است. جریان مصرفی وظایف در ۱۲ مورد بین ۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌آمپر و در ۱۲ مورد بین ۲۰ تا ۳۰۰ میلی‌آمپر در نظر گرفته شده است. برای هر مجموعه پروفایل حاصل از اجرای هر دو الگوریتم را در یک ابردوره به دست آورده‌ایم و سپس با استفاده از دو مدل باتری این مجموعه‌ها را با هم مقایسه کرده‌ایم. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.

همان گونه که در شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌نمایید در الگوریتم پیشنهادی طول عمر سیستم و بازده باتری در ۴ بار کاری بیشتر است (طول عمر سیستم بین ۴/۳٪ تا ۱۹/۶٪ توسط الگوریتم پیشنهادی افزایش یافته است). دلیل این امر این است که ما با اعمال هم‌سطح سازی توان مصرفی وظایف از این که سیستم در نقاط با توان مصرفی بالا دچار افت شود جلوگیری کرده‌ایم و افت ولتاژ را به تأخیر انداخته‌ایم. اما در الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان، هدف کم کردن هزینه بوده و توجهی به افت

در مثال فوق هزینه محاسبه شده برای پروفایل حاصل از الگوریتم پیشنهادی وقتی فقط بر اساس جریان مصرفی هر وظیفه انجام شود، ۲/۱۱ درصد و وقتی بر اساس توان مصرفی آن (در این حالت جریان از تقسیم توان مصرفی به ولتاژ میانگین به دست می‌آید) انجام شود، ۱۴/۲۴ درصد نسبت به پروفایل سوم کاهش می‌یابد.

برای ارزیابی بهتر الگوریتم پیشنهادی در تعداد زیادی اجرا به مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان پرداختیم. در این ارزیابی‌ها علاوه بر هزینه یک ابردوره دو پارامتر دیگر را مورد ارزیابی قرار دادیم که عبارتند از: الف) طول عمر سیستم (LT)، این زمان معادل زمان اولین شکست سیستم است. یعنی زمان افت ولتاژ باتری به کمتر از ولتاژ قطع و ب) مقداره بازده باتری (BE)، مقدار انرژی مورد استفاده تا زمانی که ولتاژ باتری برای اولین بار به کمتر از ولتاژ قطع برسد.

1. Life Time
2. Battery Efficiency

جدول ۱۲: هزینه محاسبه‌شده برای پروفایل‌های حاصل از ۴ الگوریتم آگاه از وضعیت باتری.

الگوریتم	∂ بر اساس جریان ($mA - \min$)	∂ بر اساس توان ($mA - \min$)
پروفایل هم‌سطح سازی جریان	۶۳۴۳	-
پروفایل غیر افزایشی	۴۳۴۲	-
پروفایل کاهش هزینه نسبت به زمان	۲۳۲۸	۳۵۹۳
پروفایل الگوریتم پیشنهادی	۲۲۸۰	۳۱۴۵

افزایش طول عمر باتری و سیستم کمک می‌کند، مهارکردن افت ولتاژ ناشی از اجرای وظایف با توان مصرفی بالا است.

مراجع

- [1] T. L. Martin, Balancing Batteries, Power, and Performance: System Issues in CPU Speed-Setting for Mobile Computing, Doctoral Dissertation, Carnegie Mellon University, 1999.
- [2] L. Benini, et al., "A discrete-time battery model for high-level power estimation," in *Proc. of Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*, vol. ???, pp. 35-39, Paris, France, 27-30 Mar. 2000.
- [3] D. Rakhmatov, Modeling and Optimization of Energy Supply and Demand for Portable Reconfigurable Electronic Systems, Ph.D. Thesis, Dept. Electr. Comput. Eng., Arizona Univ., Tucson, May 2002.
- [4] L. Benini, G. Castelli, A. Macii, and R. Scarsi, "Battery-driven dynamic power management," *IEEE Design and Test*, vol. 18, no. 2, pp. 53-60, Mar. 2001.
- [5] T. F. Fuller, M. Doyle, and J. Newman, "Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell," *J. of the Electrochemical Society*, vol. 141, no. 1, pp. 1-10, 1994.
- [6] M. Doyle, T. F. Fuller, and J. Newman, "Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell," *J. of the Electro-Chemical Society*, vol. 140, no. 6, pp. 1526-1533, Jun. 1993.
- [7] T. F. Fuller, M. Doyle, and J. Newman, "Relaxation phenomena in lithium-ion insertion cells," *J. of the Electrochemical Society*, vol. 141, no. 4, pp. 982-990, Apr. 1994.
- [8] "FORTRAN programs for the simulation of electrochemical systems," Jun. 2010, [Online]. Available: <http://www.cchem.berkeley.edu/jsngrp/fortran.html>.
- [9] P. D. Vidts and R. E. White, "Mathematical modeling of a nickel-cadmium cell: proton diffusion in the nickel electrode," *J. of the Electrochemical Society*, vol. 142, no. 1, pp. 1509-1519, May 1995.
- [10] E. Podlaha and H. Cheh, "Modeling of cylindrical alkaline cells," *J. of the Electrochemical Society*, vol. 141, no. 1, pp. 15-27, Jan. 1994.
- [11] "The spice page," Jun. 2010, [Online]. Available: <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/classes/icbook/spice/>.
- [12] S. C. Hageman, "Simple PSpice models let you simulate common battery types," *Electronic Design News*, vol. 38, no. 1, pp. 117-129, 1993.
- [13] S. Gold, "A PSpice macromodel for lithium-ion batteries," in *Proc. of the 12th Annual Battery Conf. on Applications and Advances*, pp. 215-222, 14-17 Jan 1997.
- [14] M. R. Jongerden and B. R. Haverkort, *Battery Modeling*, Centre for Telematics and Information Technology, University of Twente, Enschede, 2008.
- [15] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, "Energy management for battery-powered embedded systems," *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 277-432, Aug. 2003.
- [16] C. Chiasserini and R. Rao, "Energy efficient battery management," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 7, pp. 1235-1245, Jul. 2001.
- [17] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D. A. Wallach, "Battery lifetime predictions for energy-aware computing," in *Proc. of the Int. Symp. on Low Power Electronics and Design, ISLPED '02*, pp. 154-159, 2002.
- [18] J. Manwell and J. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems," *Solar Energy*, vol. 50, no. 5, pp. 399-405, May 1993.
- [19] C. Chiasserini and R. Rao, "A model for battery pulsed discharge with recovery effect," in *Proc. of Wireless Communications and Networking Conf.*, vol. 2, pp. 636-639, 21-24 Sep. 1999.
- [20] C. Chiasserini and R. Rao, "Pulsed battery discharge in communication devices," in *Proc. of the 5th Int. Conf. on Mobile Computing and Networking*, pp. 88-95, 1999.

ولتاژ ناشی از توان مصرفی بالا نشده است. در این الگوریتم ممکن است به علت کم‌کردن هزینه، وظایفی که توان مصرفی زیادی دارند نادیده گرفته شوند در حالی که عامل اصلی افت ولتاژ این وظایف هستند.

در شکل ۱۲ میزان بهبود الگوریتم پیشنهادی از منظر طول عمر سیستم و بازده باتری نسبت به الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان مشاهده می‌شود. همچنین در شکل‌ها دیده می‌شود که وقتی جریان مصرفی وظایف بیشتر است الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری دارد. علت آن است که در این شرایط وظایف توان مصرفی بیشتری دارند و هدف اصلی الگوریتم ما مهارکردن افت ولتاژ ناشی از توان مصرفی بالا است، بنابراین در این شرایط تأثیر بیشتری بر عملکرد سیستم دارد.

در شکل ۱۳ مقایسه هزینه محاسبه‌شده برای یک دوره نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌نمایید وقتی بار کاری سیستم بیشتر است (۰/۷ و ۰/۸) الگوریتم پیشنهادی از منظر هزینه یک ابردوره بدتر عمل می‌کند. علت این است که الگوریتم ما بر مبنای کاهش هزینه نیست و هدف آن مهارکردن افت ولتاژ ناشی از توان زیاد است، در حالی که الگوریتم کاهش هزینه نسبت به زمان، هدف اصلی آن کاهش هزینه است. اما دلیل این که الگوریتم پیشنهادی هنگام کم‌بودن بار کاری سیستم بهتر عمل می‌کند این است که در این شرایط زمان بیکاری سیستم زیاد است و الگوریتم ما می‌تواند تغییر پویای ولتاژ را روی وظایف بیشتری اعمال کند و علاوه بر مهار افت ولتاژ هزینه را بیشتر کاهش می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با اشاره بر این مطلب که توان مصرفی در هر لحظه تأثیر بسزایی در عملکرد باتری دارد، به ارائه یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از وضعیت باتری برای وظایف دوره‌ای در یک سیستم تک‌پردازنده‌ای مبتنی بر باتری با قابلیت تغییر پویای ولتاژ پرداختیم. در این الگوریتم تمرکز اصلی روی هم‌سطح‌سازی توان مصرفی وظایف است. آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه قبلی که با هدف افزایش بهره‌وری از باتری و طول عمر سیستم‌های نهفته بی‌درنگ مبتنی بر باتری طراحی شده بودند، نتایج بهتری را به دست می‌آورد. برای مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌ها از دو روش استفاده شده است. در روش اول با استفاده از تابع هزینه، میزان شارژ مصرفی برای پروفایل‌های به دست آمده از الگوریتم‌های زمان‌بندی محاسبه می‌شود و در روش دوم ولتاژ کمینه، ولتاژ نهایی، طول عمر سیستم و بازده باتری با استفاده از نتایج شبیه‌ساز Dualfoil استخراج می‌شود. نتایج آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی طول عمر سیستم و بازده باتری را به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی منجر به افزایش طول عمر سیستم بین ۱۹/۶-۴/۳ درصد در شرایط مختلف (از نظر بار کاری سیستم و محدود توان مصرفی وظایف) شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که کاهش هزینه همیشه منجر به افزایش طول عمر سیستم نمی‌شود بلکه عامل مهمی که به

- 20th Int. Parallel and Distributed Processing Sym., 25-29 April 2006.
- [31] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, "An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems," in *Proc. of the Int. Conf. on Computer Aided Design*, pp. 488-493, 2001.
- [32] A. Anderi, et al., "Overhead-conscious voltage selection for dynamic and leakage energy reduction of time-constrained systems," *IEEE Proc. of Computer and Digital Techniques*, vol. 152, no. 1, pp. 28-38, 14 Jan. 2005.
- صغری منوچهری خلاری** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ در موسسه آموزش عالی پاسارگاد شیراز و دانشکده فنی دانشگاه تهران در رشته مهندسی کامپیوتر به اتمام رسانید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های بی‌درنگ، مدیریت توان و انرژی در باتری‌ها الگوریتم‌های زمانبندی و مدیریت منابع است.
- مهدی کارگهی** در سال ۱۳۷۷ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی ارشد و در سال ۱۳۸۵ مدرک دکترای مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود. او در حال حاضر دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران است. وی همچنین از سال ۱۳۸۲ با پژوهشکده علوم کامپیوتر پژوهشگاه دانش‌های بنیادی همکاری داشته است و هم‌اکنون محقق مقیم این پژوهشکده نیز هست. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند مدل‌سازی و ارزیابی کارایی سیستم‌های تصادفی، مدیریت توان و دما در سیستم‌های بی‌درنگ و نهفته اتکاپذیر و سیستم‌های توزیع‌شده است. در ضمن، او عضو ارشد انجمن کامپیوتر IEEE نیز هست.
- [21] C. Chiasserini and R. Rao, "Improving battery performance by using traffic shaping techniques," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 7, pp. 1385-1394, Jul. 2001.
- [22] V. Rao, G. Singhal, A. Kumar, and N. Navet, "Battery model for embedded systems," in *Proc. of Int. Conf. on VLSI Design*, 105-110, Jan. 2005.
- [23] V. Rao, G. Singhal, A. Kumar, and N. Navet, "Stochastic battery model for embedded systems," in *Proc. 18th Int. Conf. on VLSI Design*, 2005.
- [24] M. R. Jongerden and B. R. Haverkort, "Which battery model to use?" in *Proc. of the 24th UK Performance Engineering Workshop*, (UKPEW), Technical Report Series of the Department of Computing, Imperial College London, pages 76-88, 2008.
- [25] T. Yokoyama, G. Zeng, H. Tomiyama, and H. Takada, "Static task scheduling algorithms based on greedy heuristics for battery-powered DVS Systems," *IEICE Trans. on Information and Systems*, vol. E93-D, no. 10, pp. 2737-2746, Oct. 2010.
- [26] P. Chowdhury and C. Chakrabarti, "Static task-scheduling algorithms for battery-powered DVS systems," *IEEE Trans. on Very Large Scale Integration Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 226-237, Feb. 2005.
- [27] J. Luo and N. K. Jha, "Battery-aware static scheduling for distributed real-time embedded systems," in *Proc. of the 38th Conf. on Design Automation*, pp. 134-139, Jun. 2001.
- [28] A. Lahiri, S. Agarwal, A. Basu, and B. B. Bhattacharya, "Recovery-based real-time static scheduling for battery life optimization," in *Proc. of the 19th Int. Conf. on VLSI Design*, pp. 59-64, 2006.
- [29] J. Zhuo and C. Chakrabarti, "An efficient dynamic task scheduling algorithm for battery powered DVS systems," in *Proc. Asia and South Pacific Design Automation Conf.*, pp. 846-849, Shanghai, China, 18-21 January 2005.
- [30] V. Rao, G. Singhal, N. Navet, A. Kumar, and G. S. Visweswaran, "Battery aware dynamic scheduling for periodic task graphs," in

Archive of SID