

دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
دانشکده مهندسی کامپیوتر

گزارش تحقیق درس طراحی و مدل سازی سیستم های نهفته

# مدیریت انرژی در شبکه های حسگر بی سیم با استفاده از فناوری های برداشت انرژی محیطی

نگارش

رضا آدینه پور

استاد درس

جناب آقای دکتر صدیقی

تیر ۱۴۰۳



## سپاس

از استاد گرانقدر خود، جناب آقای دکتر صدیقی، به خاطر راهنمایی‌های بی‌نظیر، تشویق‌ها و حمایت‌های بی‌دریغ ایشان در طول این پروژه تحقیقاتی، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. بازخوردهای سازنده و تعهد بی‌پایان ایشان نقش بسزایی در شکل‌گیری این پژوهش داشته است.

از صبر و درک ایشان که مرا به تلاش برای برتری و غلبه بر چالش‌های متعدد الهام بخشیدند، بسیار سپاسگزارم. دانش عمیق و تخصص ایشان در این حوزه، تجربه تحقیقاتی و رشد علمی مرا به طور قابل توجهی غنی‌تر ساخته است.

## چکیده

در دنیای امروز بحث IoT یکی از مسائل رو به رشد در زندگی بشر می باشد. سرعت این رشد خصوصاً در سال های اخیر بسیار زیاد بوده و پیش بینی می گردد که این پیشرفت با گام های بزرگ تری در آینده نیز دنبال گردد. مسئله توان و انرژی در سیستم های IoT یکی از مسائل مهم در راستای استفاده مناسب از آن ها می باشد. بسیاری از کاربردهای IoT در صنایع مختلف، به دلیل مسئله تامین توان مورد نیاز جهت عملکرد، علی رغم وجود راه حل برای باقی چالش های به کارگیری هنوز به صورت تجاری به بازار معرفی نشده اند. با حل مسئله تامین توان، بازار بزرگی در انتظار لوازم IoT خواهد بود. این موضوع با بهره گیری از تحقیقات و مقالات اخیر و مقایسه مدل های مختلف تامین توان با استفاده از روش های برداشت توان از محیط در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه ها: اینترنت اشیاء، سیستم های توان پایین، برداشت توان از محیط، ذخیره سازی انرژی، تبدیل انرژی

# فهرست مطالب

۱	مقدمه	۱
۱-۱	تعریف مسئله	۱
۲-۱	اهمیت پژوهش	۲
۳-۱	اهداف پژوهش	۲
۴-۱	ساختار پژوهش	۳
۲	مفاهیم اولیه	۴
۱-۲	معماری کلی سیستم‌های IoT با نگرش به مصرف توان	۴
۲-۲	انتخاب سیستم پردازشی	۶
۳-۲	مدارات تغذیه	۹
۴-۲	مدارات ارتباطی	۱۰
۵-۲	تامین توان و ذخیره‌سازی انرژی	۱۱
۶-۲	سفت افزار	۱۱
۳	کارهای پیشین	۱۳
۱-۳	مقدمه	۱۳
۲-۳	روش‌های برداشت توان از محیط	۱۶
۱-۲-۳	برداشت انرژی نوری از محیط	۱۷
۲-۲-۳	برداشت توان از انرژی مکانیکی محیط	۱۷

۱۹	.....	۳-۲-۳ تبدیل گرما به انرژی الکتریکی
۲۰	.....	۴-۲-۳ دریافت توان با استفاده از امواج
۲۳	.....	۳-۳ ذخیره‌سازهای انرژی
۲۶	.....	۴-۳ ترکیب چند روش دریافت توان از محیط
۲۷		۴ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی
۲۸		مراجع

## فهرست جداول

۱۷	۱-۳ چگالی توان و میزان توان معمول قابل برداشت
۲۱	۲-۳ چگالی انرژی امواج در شهر لندن
۲۱	۳-۳ تاثیر فاصله بر میزان انرژی آنتن
۲۲	۴-۳ تاثیر نوع آنتن بر انرژی جذب شده (آنتن جهت دار)
۲۴	۵-۳ مقایسه باتری‌ها [۱]
۲۴	۶-۳ مقایسه باتری‌های قابل شارژ سیستم‌های IoT [۲]
۲۵	۷-۳ مشخصات چند ابرخازن نمونه [۱]
۲۵	۸-۳ مقایسه ابرخازن‌ها و باتری‌های قابل شارژ [۲]

# فهرست تصاویر

۱-۱	برآورد توان در سیستم‌های IoT [۳]	۱
۱-۲	معماری یک سیستم IoT [۴]	۵
۲-۲	طبقه‌بندی سیستم‌های IoT از نظر توان و منابع [۵]	۵
۳-۲	مشخصات تراشه STM32L552xx [۶]	۶
۴-۲	روش قطع کلاک	۷
۵-۲	روش قطع توان	۸
۶-۲	تراشه TPS783	۹
۷-۲	تراشه TPS62743	۱۰
۱-۳	بلوک دیاگرام یک سیستم برداشت توان از محیط [۷]	۱۴
۲-۳	مبدل‌های سوئیچینگ [۸]	۱۵
۳-۳	منابع مختلف برداشت توان [۹]	۱۶
۴-۳	مبدل الکترومغناطیسی	۱۸
۵-۳	مبدل‌های الکتروستاتیک	۱۹
۶-۳	مبدل پیزوالکتریک	۱۹
۷-۳	ساختار TEG	۲۰
۸-۳	دیاگرام داخلی یک سیستم SWIPT	۲۲
۹-۳	دیاگرام داخلی یک RFID Tag	۲۳
۱۰-۳	یک Rectenna ساده [۱۰]	۲۳



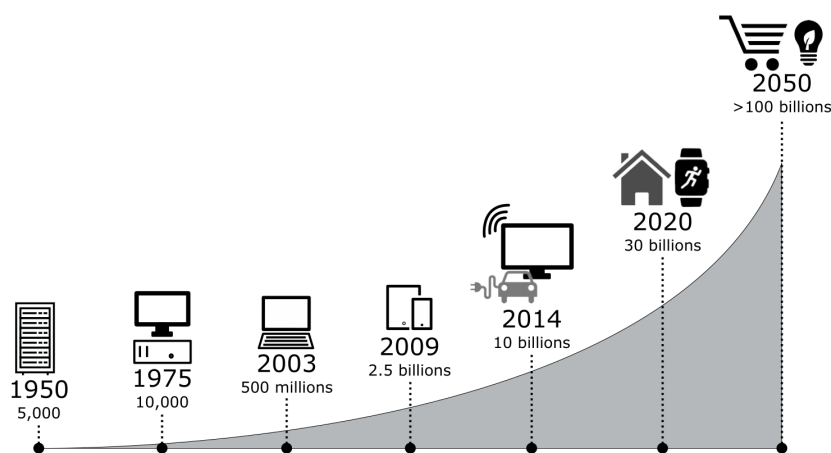


# فصل ۱

## مقدمه

### ۱-۱ تعریف مسئله

ابزارهای IoT<sup>۱</sup> و تکنولوژی‌های وابسته به آن در حال پیشرفت سریع و ورود به زندگی روزمره بشر هستند. سرعت این امر به قدری بالا است که در آینده نزدیک تقریباً تمامی لوازم به شبکه اینترنت متصل خواهند بود و مفهومی با نام IoET<sup>۲</sup> در زندگی بشر ایجاد خواهد شد. این مسئله در شکلی زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱: برآورد توان در سیستم‌های IoT [۳]

نیازهای کلی این لوازم از دیدگاه طراحی از زوایای مختلف قابل بررسی می‌باشند، اما به طور کلی می‌توان موارد زیر را به صورت خلاصه بیان کرد:

- سیستم پردازش

<sup>1</sup>Internet of Things

<sup>2</sup>Internet of Every Things

- روش‌های انتقال اطلاعات

- تامین توان مورد نیاز

در تمامی موارد ذکر شده استفاده از روش‌هایی جهت بهینه سازی در راستای افزایش کارایی و در دسترس بودن سیستم انجام پذیرفته است. این موضوع به دلیل رشد کندتر قطعات با قابلیت ذخیره انرژی مانند ابرخازن‌ها<sup>۳</sup> و باتری‌ها با سرعت کمتری انجام شده است. لذا یکی از مهمترین مسائل در سیستم‌های IoT خصوصاً نمونه‌های بدون دسترسی مستقیم به شبکه برق، تامین پایدار توان مصرفی آن‌ها می‌باشد. این موضوع از جهات دیگری نیز قابل بررسی است، به عنوان مثال با رشد کاربرد سیستم‌های IoT و کاربرد وسیع آن‌ها، در صورت وجود توان مصرفی بالا و نیاز به تعویض سریع باتری‌ها، مشکلات تولیدی و زیست محیطی فراوانی ایجاد خواهد گردید. همچنین قابلیت اطمینان چنین سیستم‌هایی به دلیل مشکل تامین توان پایدار مورد نیاز بسیار پایین خواهد بود.

## ۲-۱ اهمیت پژوهش

بدون شک، بحث توان در سیستم‌های IoT از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به رشد روزافزون فناوری‌های اینترنت اشیا و نیاز مبرم به دستگاه‌های کم‌مصرف<sup>۴</sup> و خودمختار<sup>۵</sup>، استفاده از منابع انرژی محیطی برای تأمین انرژی این دستگاه‌ها نقش حیاتی دارد. این امر نه تنها به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش طول عمر مفید<sup>۶</sup> شبکه‌های حسگر بی‌سیم کمک می‌کند، بلکه باعث کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از استفاده از باتری‌های سنتی می‌شود. پژوهش در این زمینه می‌تواند به توسعه راهکارهای نوآورانه برای افزایش بهره‌وری انرژی، بهبود پایداری و کارایی سیستم‌های IoT و در نهایت ارتقای کیفیت زندگی انسان‌ها منجر شود.

## ۳-۱ اهداف پژوهش

در این نوشته سعی می‌گردد که در ابتدا مسائل موجود در سیستم‌های IoT که مرتبط با توان مصرفی هستند مورد بررسی کوتاهی قرار گیرد و سپس راه‌حل‌های موجود برای هر مورد معرفی گردند. سپس به مسئله اصلی تامین توان مصرفی سیستم‌های IoT و قابل حمل با استفاده از تکنیک‌های برداشت انرژی از محیط پرداخته می‌شود و با مقایسه روش‌های موجود و بهره‌وری هر یک نتایج حاصله ارائه می‌گردد. در انتها نیز به چند روش جدیدتر

<sup>3</sup>Supercapacitor

<sup>4</sup>Low Power

<sup>5</sup>Autonomous

<sup>6</sup>Remaining Useful Life

تأمین توان با استفاده از برداشت انرژی از محیط پرداخته می‌شود. برخی راهکارهای پیشنهادی و نمونه‌های عملی حاصل از تحقیق در این خصوص نیز ارائه می‌گردد.

## ۴-۱ ساختار پژوهش

این پژوهش در ۴ فصل انجام شده است. در فصل ۱ به مقدمه و اهمیت موضوع پژوهش پرداخته شده است. در فصل ۲ به مفاهیم اولیه و پیش‌نیازها پرداخته شده است. در ادامه در فصل ۳ پژوهش به بررسی کارهای پیشین انجام شده در این زمینه پرداخته شده است. و در فصل پایانی، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پژوهش ارائه شده است.

## فصل ۲

### مفاهیم اولیه

#### ۱-۲ معماری کلی سیستم‌های IoT با نگرش به مصرف توان

به طور کلی سیستم‌های IoT اطلاعاتی را از محیط برداشت و پس از پردازش اولیه (و یا به صورت خام در برخی موارد) نتایج را از طریق یک کانال ارتباطی به خدمات‌دهنده ارسال می‌کنند و سپس با توجه به کاربرد سیستم ممکن است در پاسخ عملی را نیز در محیط انجام دهد. در حقیقت یک سیستم IoT یک سیستم نهفته<sup>۱</sup> می‌باشد که به شبکه اینترنت متصل است و از طریق آن، به رد و بدل اطلاعات با خدمات‌دهنده می‌پردازد. چنین سیستم‌هایی کاربردهای بالقوه فراوانی را در زمینه‌های مختلف دارند که می‌توان به موارد زیر به عنوان برخی از کاربردهای گسترده آن اشاره نمود:

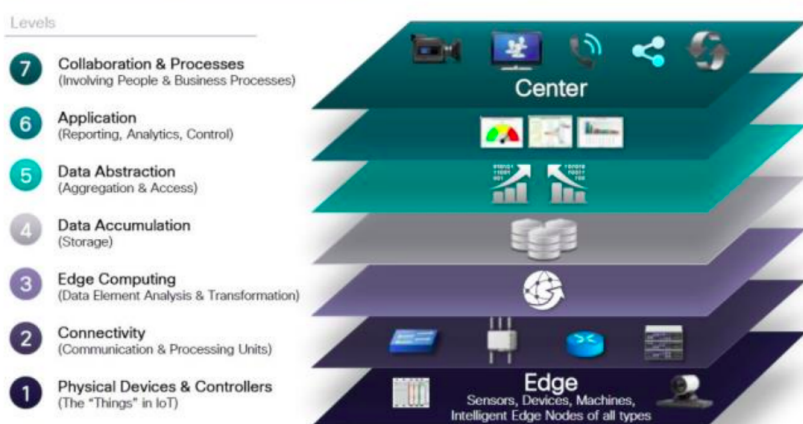
- لوازم متصل سلامتی شخصی
- کشاورزی هوشمند متصل
- سیستم‌های مدیریت هوشمند ساختمان
- سیستم‌های متصل مدیریت مصرف منابع (مانند آب و برق و گاز)
- ذخیره‌سازی تامین هوشمند
- خودروهای متصل
- صنایع متصل

---

<sup>1</sup>Embedded

لایه‌های معماری یک سیستم IoT در شکل زیر آمده است.

IoT World Forum Reference Model



شکل ۱-۲: معماری یک سیستم IoT [۴]

آنچه در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد قسمت مربوط به Physical Device ها در سیستم IoT می‌باشد. در Physical Device با توجه به محدودیت‌های حجم، وزن، قیمت و کاربری آن، توان در دسترس برای سیستم می‌تواند محدود باشد، لذا استفاده بهینه از توان در هر بخش بسیار مورد توجه است.

در شکل زیر به انواع مختلف سیستم‌های IoT مورد استفاده با توجه به میزان منابع و همچنین مصرف توان آنها اشاره شده است:

Feature	Architecture option					
	No OS or RTOS	Language runtime	Full OS	App OS	Server OS	Container OS
Typical devices	Simple sensor devices, heartbeat sensors, lightbulbs, and so on	Feature watches, more advanced sensing devices	"Maker" devices, generic sensing solutions	High-end smartwatches	Solutions benefiting from a portable webserver and edge-computing capabilities	Solutions benefiting from fully isomorphic apps—that is, code that can be migrated between the cloud and the edge
Minimum required RAM	Tens of kilobytes	Hundreds of kilobytes	A few megabytes	Hundreds of megabytes	Tens of megabytes	Gigabytes
Typical communication protocols	Constrained (MQTT, LWM2M, CoAP)	Constrained (MQTT, LWM2M, CoAP)	Standard Internet protocols (HTTP, HTTPS)	Standard Internet protocols (HTTP, HTTPS)	Standard Internet protocols (HTTP, HTTPS)	Standard Internet protocols (HTTP, HTTPS)
Typical development language	C or assembly	Java, JavaScript, Python	C or C++	Java, ObjectiveC, Swift	JavaScript	Various
Libraries	None or system-specific	Language-specific generic libraries	OS libraries, generic UI libraries	Platform libraries	Node.js npm modules	Various
Dynamic software updates	Firmware updates only	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Third-party apps supported	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Isomorphic apps possible	No	Yes	Only if the hardware architectures are binary compatible	Yes	Yes	Yes

\* RTOS = real-time operating system, VM = virtual machine, MQTT = MQ Telemetry Transport, LWM2M = Lightweight Machine-to-Machine, and CoAP = Constrained Application Protocol.

شکل ۲-۲: طبقه‌بندی سیستم‌های IoT از نظر توان و منابع [۵]

موارد آورده شده در قسمت ۱ و ۲ شکل دارای مصرف توان بسیار پایین هستند و از تکنیک‌های مختلف

جهت کاهش مصرف استفاده می‌کنند و در لایه ارتباطی نیز از روش‌های مبتنی بر ارتباطات با توان پایین استفاده می‌نمایند. [۵]

استفاده از پردازنده‌های با توان پایین و همچنین مدارات تغذیه با جریان نشتی<sup>۲</sup> حالت خاموشی بسیار کم نیز از الزامات طراحی چنین سیستم‌هایی می‌باشد. [۱۱]

سخت‌افزار<sup>۳</sup> مورد استفاده در این لوازم بایستی برای حداکثر کاهش مصرف توان بهینه شده باشد که یکی از مهمترین بخش‌های سیستم می‌باشد و می‌تواند کارایی یک سخت‌افزار خوب را در صورت عدم کارکرد صحیح به شدت تحت تاثیر قرار دهد. در ادامه نکات استخراج شده از تحقیقات مختلف در خصوص هر بخش به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲ انتخاب سیستم پردازشی

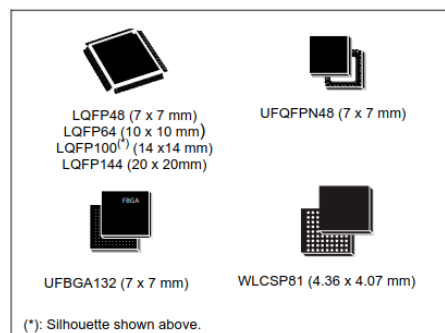
در خصوص پردازنده سیستم، می‌بایست نکاتی از قبیل قابلیت انجام فعالیت‌های مورد نظر با سرعت مناسب و توان مصرفی پایین برای اجرای هر بخش از کد توسط طراح رعایت گردند. در سیستم‌های IoT با توان بسیار پایین، به دلیل اینکه زمان کاری سیستم در حالت idle می‌باشد، کم بودن توان Static در پردازنده ضروری است. [۱۲] به عنوان مثال در پردازنده‌های مدرن کم مصرفی همچون خانواده STM32L552xx توان مصرفی در حالت‌های مختلف کاهش توان به صورت زیر است.

### Features

#### Ultra-low-power with FlexPowerControl

- 1.71 V to 3.6 V power supply
- -40 °C to 85/125 °C temperature range
- Batch acquisition mode (BAM)
- 187 nA in VBAT mode: supply for RTC and 32x32-bit backup registers
- 17 nA Shutdown mode (5 wakeup pins)
- 108 nA Standby mode (5 wakeup pins)
- 222 nA Standby mode with RTC
- 3.16  $\mu$ A Stop 2 with RTC
- 106  $\mu$ A/MHz Run mode (LDO mode)
- 62  $\mu$ A/MHz Run mode @ 3 V (SMPS step-down converter mode)
- 5  $\mu$ s wakeup from Stop mode
- Brownout reset (BOR) in all modes except Shutdown

#### Core



(\*): Silhouette shown above.

#### Memories

- Up to 512-Kbyte Flash, two banks read-while-write
- 256 Kbytes of SRAM including 64 Kbytes with hardware parity check
- External memory interface supporting SRAM, PSRAM, NOR, NAND and FRAM memories
- OCTOSPI memory interface

شکل ۲-۳: مشخصات تراشه STM32L552xx [۶]

<sup>۲</sup>Quiescent Current

<sup>۳</sup>Firmware

همان‌گونه که مشاهده می‌شود این مقدار بسیار نسبت به پردازنده‌ها و میکروکنترلرهای قدیمی‌تر کاهش یافته‌است که بهبود پروسه تولید، کاهش سائز ترانزیستورها، بهبود پیاده‌سازی‌های سخت‌افزاری، کاهش ولتاژ کاری و قابلیت کار در محدوده فرکانسی وسیع سیستم از دلایل این امر می‌باشد. [۱۳]

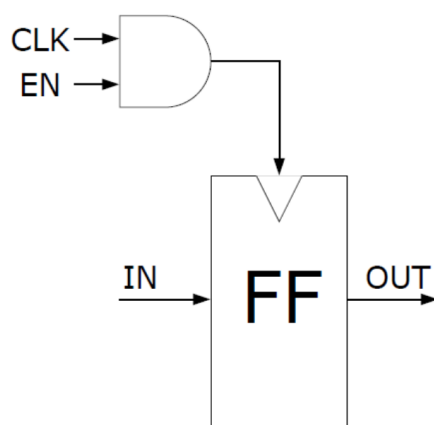
همچنین پشتیبانی از مواردی همچون DVFS<sup>۴</sup>، وجود حالت‌های مختلف Power، وجود کامپایلر با دید به محدودیت توان می‌تواند بسیار در مصرف توان محصول نهایی موثر باشد. [۱۲]

نکته بسیار مهم در انتخاب یک پردازنده در سیستم‌های نهفته مورد استفاده در کاربردهای IoT زمان خروج پایین از حالت‌های با مصرف کاهش یافته به حالت عملکرد کامل می‌باشد.

در سیستم‌های مورد بررسی در این پژوهش فرض بر این است که نیازی به MMU<sup>۵</sup> جهت مدیریت حافظه نمی‌باشد و توان میکروکنترلرهای فاقد این واحد را برای ایجاد سفت‌افزار، بدون RTOS<sup>۶</sup> و یا RTOS‌های ساده‌ای مانند FreeRTOS استفاده نمود. دلیل این امر پیچیدگی زیاد و وجود این بخش در تحلیل و بررسی حالت‌های مختلف بوجود آمده در سیستم می‌باشد.

پردازنده انتخابی بایستی قابلیت قطع تغذیه و کلاک بخش‌هایی که در فعالیت انجامی مورد استفاده نیستند را دارا باشد. به عنوان مثال در صورت عدم نیاز به بخش ADC بتوان کلاک و توان تحویلی به آن را در میکروکنترلر قطع نمود. در اکثر میکروکنترلرها این امر با قطع کلاک صورت می‌پذیرد اما در مواردی نیز قطع کامل توان نیز وجود دارد.

دو روش قطع کلاک و قطع توان به ترتیب در اشکال زیر نمایش داده شده‌اند. [۳]



شکل ۲-۴: روش قطع کلاک

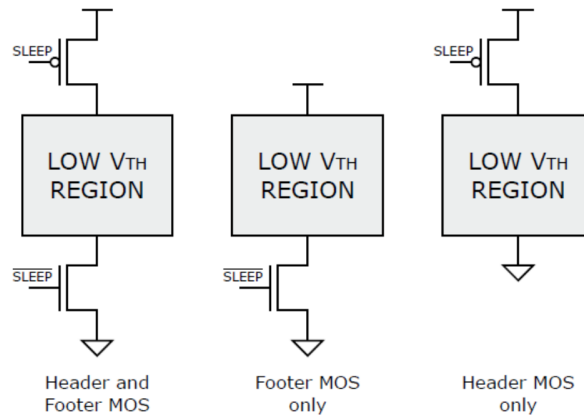
در صورتی که کاربری مورد نظر دارای زمان‌های idle طولانی باشد بایستی میکروکنترلر و یا پردازنده انتخابی دارای مدهای خواب عمیق باشد تا در این صورت بتوان به حداکثر میزان کاهش مصرف دست یافت.

<sup>۴</sup>Dynamic Voltage Frequency Scaling

<sup>۵</sup>Memory Management Unit

<sup>۶</sup>Real-Time Operating System





شکل ۲-۵: روش قطع توان

در این حالت معمولاً پردازنده توسط یک تحریک خارجی و یا زمانبندی <sup>۷</sup>RTC از این حالت خارج شده و پس از انجام عمل مورد نیاز که بایستی تا حد ممکن کوتاه باشد، مجدداً به حالت خواب عمیق بازمی‌گردد. مسئله مهم دیگر در انتخاب یک پردازنده مناسب وجود حافظه کافی با قابلیت مصرف کم انرژی می‌باشد. نسل‌های جدید حافظه مانند <sup>۸</sup>ReRAM، <sup>۹</sup>FeRAM، <sup>۱۰</sup>PCM RAM و <sup>۱۱</sup>MRAM نیز در این خصوص با دارا بودن مصرف کم و قابلیت نگهداری اطلاعات بدون نیاز به منبع بسیار در کاهش مصرف موثر خواهند بود. [۳]

در صورتی که کاربری مورد نظر دارای زمان‌های idle طولانی باشد بایستی میکروکنترلر و یا پردازنده انتخابی دارای مدهای خواب عمیق باشد تا در این صورت بتوان به حداکثر میزان کاهش مصرف دست یافت.

در این حالت معمولاً پردازنده توسط یک تحریک خارجی و یا زمانبندی <sup>۱</sup>RTC از این حالت خارج شده و پس از انجام عمل مورد نیاز که بایستی تا حد ممکن کوتاه باشد، مجدداً به حالت خواب عمیق بازمی‌گردد.

مسئله مهم دیگر در انتخاب یک پردازنده مناسب وجود حافظه کافی با قابلیت مصرف کم انرژی می‌باشد. نسل‌های جدید حافظه مانند <sup>۵</sup>MRAM، <sup>۶</sup>PCRAM، <sup>۹</sup>FeRAM، <sup>۸</sup>ReRAM نیز در این خصوص با دارا بودن مصرف کم و قابلیت نگهداری اطلاعات بدون نیاز به منبع بسیار در کاهش مصرف موثر خواهند بود. [۱] در صورتی که کاربری مورد نظر دارای زمان‌های idle طولانی باشد بایستی میکروکنترلر و یا پردازنده انتخابی دارای مدهای خواب عمیق باشد تا در این صورت بتوان به حداکثر میزان کاهش مصرف دست یافت.

در این حالت معمولاً پردازنده توسط یک تحریک خارجی و یا زمانبندی <sup>۱</sup>RTC از این حالت خارج شده و

<sup>7</sup>Real Time Clock

<sup>8</sup>Resistive RAM

<sup>9</sup>Ferroelectric RAM


<sup>10</sup>Phase-Change RAM

<sup>11</sup>Magnetic RAM

پس از انجام عمل مورد نیاز که بایستی تا حد ممکن کوتاه باشد، مجدداً به حالت خواب عمیق بازمی‌گردد. مسئله مهم دیگر در انتخاب یک پردازنده مناسب وجود حافظه کافی با قابلیت مصرف کم انرژی می‌باشد. نسل‌های جدید حافظه مانند ReRAM، FeRAM، PCRAM، MRAM<sup>۵</sup> نیز در این خصوص با دارا بودن مصرف کم و قابلیت نگهداری اطلاعات بدون نیاز به منبع بسیار در کاهش مصرف موثر خواهند بود. [1] وجود یا عدم وجود قسمت‌های سخت‌افزاری برای عملکردهای خاص همچون شتابدهی به رمزنگاری و رمزگشایی نیز می‌تواند در عملکرد کلی سیستم از نظر مصرف توان بسیار موثر باشد. [۱۴]

## ۳-۲ مدارات تغذیه

مدارات مربوط به بخش تغذیه نقش عمده‌ای در مصرف توان Static مدار دارند. تکنیک‌های Power\_Gating مشابه آنچه در میکروکنترلرها شاهد آن بودیم در سطح مدار نیز می‌تواند برای قطع توان به قسمت‌هایی که مورد نیاز نمی‌باشد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مدارات تنظیم ولتاژ مورد استفاده می‌بایست از نوع با جریان نشتی بسیار پایین انتخاب گردند<sup>۱۲</sup>. در صورتی که بتوان از اتصال مستقیم باتری به مدار استفاده کرد این روش به دلیل عدم وجود توان تلفاتی در رگلاتور بیشترین عمر باتری را خواهد داشت. همچنین رگلاتورهای خطی و غیرخطی با جریان نشتی حالت خاموشی بسیار پایین وجود دارند که در شکل‌های بعدی به دو نمونه از آنها اشاره شده است:

 TEXAS INSTRUMENTS	TPS783 SBVS133A – FEBRUARY 2010 – REVISED NOVEMBER 2014
TPS783xx 500-nA $I_Q$ , 150-mA, Ultralow Quiescent Current Low-Dropout Linear Regulator	
<b>1 Features</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Input Voltage Range: 2.2 V to 5.5 V</li> <li>• Low Quiescent Current (<math>I_Q</math>): 500 nA</li> <li>• 150-mA, Low-Dropout Regulator</li> <li>• Low-Dropout at 25°C, 130 mV at 150 mA</li> <li>• Low-Dropout at 85°C, 175 mV at 150 mA</li> <li>• 3% Accuracy Over Load, Line, and Temperature</li> <li>• Stable with a 1.0-μF Ceramic Capacitor</li> <li>• Thermal Shutdown and Overcurrent Protection</li> <li>• CMOS Logic Level-Compatible Enable Pin</li> <li>• DDC (SOT-5) Package</li> </ul>	<b>3 Description</b> <p>The TPS783 family of low-dropout regulators (LDOs) offers the benefits of ultralow power and miniaturized packaging.</p> <p>This LDO family is designed specifically for battery-powered applications where ultralow quiescent current is a critical parameter. The TPS783, with ultralow <math>I_Q</math> (500 nA), is ideal for microprocessors, microcontrollers, and other battery-powered applications.</p> <p>The absence of pulldown circuitry at the output of the LDO provides the flexibility to use the regulator output capacitor as a temporary backup power supply (for example, during battery replacement).</p> <p>The ultralow power and miniaturized packaging allow designers to customize power consumption for specific applications. Consult with your local factory representative for exact voltage options and ordering information; minimum order quantities may apply.</p> <p>The TPS783 family is compatible with the TI MSP430 and other similar products. The enable pin (EN) is compatible with standard CMOS logic. This device allows for minimal board space because of miniaturized packaging and a potentially small output capacitor. The TPS783 family also features thermal</p>
<b>2 Applications</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• TI MSP430 Attach Applications</li> <li>• Wireless Handsets and Smartphones</li> <li>• MP3 Players</li> <li>• Battery-Operated Handheld Products</li> </ul>	

شکل ۲-۶: تراشه TPS783

<sup>12</sup>Paidimarri2017

**TPS62743 TPS627431 300/400 mA High Efficiency Buck Converter with Ultra-low Quiescent Current**

**1 Features**

- Input voltage range  $V_{IN}$  from 2.15 V to 5.5 V
- Input voltage range down to 2.0 V once started
- output current
  - TPS62743 300 mA
  - TPS627431 400 mA
- 360-nA operational quiescent current
- Up to 90% efficiency at 10- $\mu$ A output current
- Power save mode operation
- Selectable output voltages
  - Eight voltage options between 1.2 V to 3.3 V
- Output voltage discharge
- Low output voltage ripple
- Automatic transition to no ripple 100% mode
- RF friendly DCS-Control™
- Total solution size < 10 mm<sup>2</sup>
- Small 1.6-mm × 0.9-mm, 8-ball WCSP package

**2 Applications**

- Wearables
- Fitness tracker
- Smartwatch
- Health monitoring

**3 Description**

The TPS62743 is a high efficiency step down converter with ultra low quiescent current of typical 360 nA. The device is optimized to operate with a 2.2- $\mu$ H inductor and 10 $\mu$ F output capacitor. The device uses DCS-Control™ and operates with a typical switching frequency of 1.2 MHz. In Power Save Mode the device extends the light load efficiency down to a load current range of 10- $\mu$ A and below. TPS62743 provides an output current of 300 mA. Once started the device operates down to an input voltage range of 2.0 V. This allows to operate the device directly from a single Li-MnO<sub>2</sub> coin cell.

The TPS62743 provides 8 programmable output voltages between 1.2V and 3.3V selectable by three selection pins. The TPS62743 is optimized to provide a low output voltage ripple and low noise using a small output capacitor. Once the input voltage comes close to the output voltage the device enters the No Ripple 100% mode to prevent an increase of output ripple voltage. In this operation mode the device stops switching and turns the high side MOSFET switch on.

شکل ۲-۷: تراشه TPS62743

## ۴-۲ مدارات ارتباطی

قسمت ارتباطات یکی از قسمت‌هایی است که در هنگام کارکرد بسته به روش ارتباطی انتخابی، توان به نسبت بالایی را مورد استفاده قرار می‌دهد. انتخاب این بخش می‌تواند بر کارایی سیستم تاثیر فراوانی داشته باشد. این تاثیر از دو جهت توان مصرفی و دسترسی مناسب به اطلاعات سیستم، قابل بررسی است و معمولاً یک سیستم مخابراتی با برد بلند توان مصرفی بیشتری نسبت به سیستم مشابه با برد کمتر را دارد، لذا می‌بایست در طراحی سیستم موارد مربوط به برد بهینه مدار مخابراتی و همچنین نحوه عملکرد آن مانند ارتباط مستقیم نقطه به نقطه، ارتباط به صورت Mesh نوع مدولاسیون و ... مورد توجه قرار گیرد.

بخش عمده‌ای از توان در بخش سیستم مخابراتی در زمانی سیستم در حالت گیرندگی قرار دارد استفاده می‌گردد. در صورتی که بتوان الگوریتم ارتباطی را به صورتی ایجاد نمود که تنها نیاز به روشن بودن گیرنده رادیویی در مدت کوتاهی باشد و یا به طور کلی نیازی به استفاده از این حالت نباشد، توان مصرفی تا حد زیادی کاهش خواهد یافت. علت این امر نامعلوم بودن زمان ارسال توسط فرستنده در شبکه می‌باشد. استفاده از تکنیک‌های گیرنده‌های خودبیدار<sup>۱۳</sup> شونده نیز از روش‌های موثر در کاهش مصرف این بخش می‌باشد. [۱۵]

<sup>13</sup>Wake-Up-Ratio

## ۵-۲ تامین توان و ذخیره‌سازی انرژی

تامین توان سیستم می‌تواند به صورت متصل و یا غیر متصل به شبکه برق باشد. در حالت غیر متصل جهت تامین توان مصرفی سیستم، استفاده از باتری با ظرفیت بالا و یا برداشت انرژی از محیط می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در صورت انتخاب باتری برای تامین توان بدون منبع خارجی جهت شارژ، بایستی توجه داشت که جریان دشارژ خود به خودی باتری یک عامل مهم در کاهش زمان مفید عملکرد سیستم است، لذا برای حل این مشکل بایستی از انواعی از باتری که جریان دشارژ خود به خودی پایینی دارند استفاده نمود.

عمر مفید باتری نیز نکته مهم دیگری در انتخاب باتری خصوصاً در سیستم‌های با تامین توان خارجی ناپایدار و شارژهای متعدد است. این امر در سیستم‌های با برداشت توان از محیط که با توجه به نوع سیستم مورد استفاده، دائماً باتری بین حالت شارژ و دشارژ سوئیچ می‌نماید بسیار مهم می‌باشد زیرا که این امر می‌تواند باعث کاهش عمر مفید باتری و یا کاهش ظرفیت آن گردد. در این گونه موارد استفاده از ابر خازن‌ها نیز می‌تواند مفید باشد [۱۶].

## ۶-۲ سفت افزار

مواردی همچون نحوه عملکرد پردازنده در سیستم در هنگام خروج از حالت خواب عمیق میزان زمان خواب عمیق و نحوه خروج از آن، چگونگی به‌کارگیری مدارات مختلف پردازش داده‌ها، ارتباط با سرور و بسیاری موارد دیگر توسط سفت‌افزار یک سیستم مدیریت می‌گردد.

نحوه مدیریت Process ها و Task ها نیز در سفت‌افزار بنا بر وجود و یا عدم وجود یک RTOS به روش‌های مختلف انجام می‌پذیرد. نکته مهم در خصوص سفت‌افزار وابستگی شدید توان مصرفی به نحوه انجام یک عمل می‌باشد. به گونه ای که ممکن است یک کد نامناسب در سفت‌افزار باعث عدم عملکرد صحیح سیستم گردد و با ورود سیستم به حالت Deadlock باعث عدم پاسخ سیستم و تخلیه باتری گردد. در این حالت، به کارگیری Watchdog می‌تواند کمک کننده باشد لذا در انتخاب میکروکنترلر بایستی موردی انتخاب گردد که دارای Watchdog سخت‌افزاری باشد. بایستی توجه داشت که اکثر میکروکنترلرهای کنونی دارای این واحد می‌باشند اما تفاوت آن‌ها در قابلیت‌ها و درجه استقلال اجرایی می‌باشد. استفاده و یا عدم استفاده صحیح از یک بخش مدار توسط سفت‌افزار می‌تواند باعث ایجاد توان تلفاتی در مدار گردد. به عنوان مثال روشن نمودن قسمت‌های بدون استفاده در میکروکنترلر و یا عدم استفاده از واحد شتاب‌دهنده سخت‌افزاری [۱۴] می‌تواند مثالی از این موارد باشد.

پس از بررسی اولیه بخش‌های مختلف به بررسی دقیق‌تر بحث توان با رویکرد برداشت توان از محیط پرداخته

می‌شود و انواع مختلف انجام این روش و همچنین مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## فصل ۳

# کارهای پیشین

### ۱-۳ مقدمه

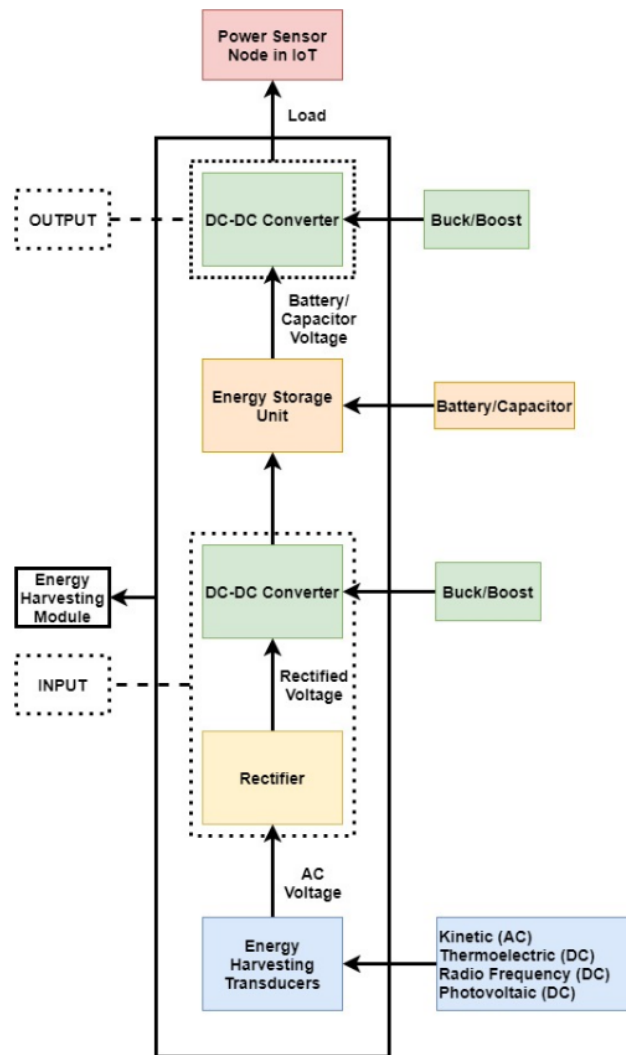
یک روش برای تامین توان سیستم‌های IoT غیر متصل به شبکه برق استفاده از سیستم برداشت توان از محیط می‌باشد. در این روش با توجه به وجود انرژی غیر الکتریکی در محیط و تبدیل این انرژی به روش‌های گوناگون به انرژی الکتریکی، می‌توان یک سیستم IoT بدون نیاز به تغذیه را طراحی نمود.

در تمامی سیستم‌های با قابلیت برداشت توان از محیط، یک بخش مربوط به مدیریت توان و تبدیل سطوح وجود دارد. طراحی این قسمت با توجه به نوع سیستم برداشت توان از محیط و سطح ولتاژ و جریان آن و همچنین توان مورد نیاز سیستم استفاده کننده توان متفاوت است اما به طور کلی می‌توان چنین سیستمی را مطابق شکل «۱-۳» نمایش داد:

طبق شکل «۱-۳» با توجه به اینکه سطح ولتاژ دریافتی از محیط و پایداری آن معمولاً مناسب تغذیه مدار پردازنده و باقی قسمت‌های مدار نیست در ابتدا با استفاده از یک مبدل DC/DC سطح ولتاژ به سطح مناسب تبدیل می‌گردد و سپس توسط یک رگلاتور ولتاژ، به ولتاژ پایدار و مناسب برای استفاده باقی مدار تبدیل می‌گردد. [۱۷]

در میان قسمت مبدل DC/DC و رگلاتور، ممکن است یک عنصر قابل شارژ با ظرفیت بالا وجود داشته باشد (تقریباً در تمامی سیستم‌ها یک خازن برای پایداری در برابر تغییرات وجود دارد)، که ممکن است از نوع باری قابل شارژ و یا ابرخازن باشد. با توجه به وجود یا عدم وجود این بخش دو دسته

۱. دارای عنصر ذخیره‌ساز



شکل ۳-۱: بلوک دیاگرام یک سیستم برداشت توان از محیط [۷]

## ۲. بدون عنصر ذخیره‌ساز

در سیستم‌های برداشت توان از محیط تعریف می‌گردند. سیستم‌های بدون عنصر ذخیره‌ساز در کاربردهای بسیار کم‌توان زمان و یا قیمت کم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

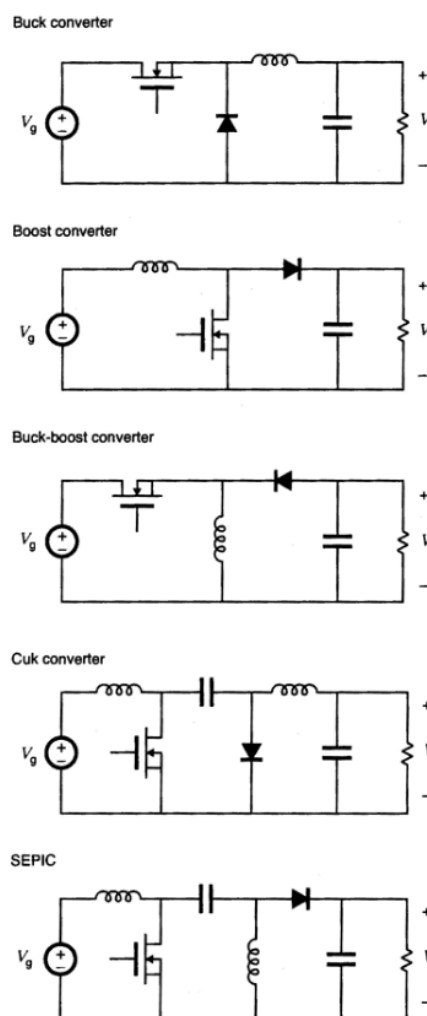
در صورت برداشت توان به صورت AC از محیط بایستی توجه داشت که در قسمت یکسوساز ورودی سیستم با توجه به نوع روش برداشت، پهنای باند سیگنال آن از چند هرتز تا چندین گیگاهرتز می‌تواند باشد و لذا برای هر مدل برداشت می‌بایست طراحی منحصر به فردی برای قسمت یکسوساز وجود داشته باشد. [۱۷]

به عنوان مثال در برداشت توان از محیط با استفاده از حرکت افراد، فرکانس ولتاژ ایجاد شده در حد چند هرتز می‌باشد اما در خصوص برداشت توان از سیستم RF این فرکانس برابر با چندین گیگاهرتز می‌باشد.

برخی از روش‌ها در برداشت توان از محیط ولتاژ را به صورت DC ایجاد می‌نماید که در این حالت احتیاجی

به قسمت یکسوساز ورودی نمی‌باشد. به عنوان مثال می‌توان به پنل‌های خورشیدی<sup>۱</sup> اشاره نمود که خروجی آن‌ها به صورت DC می‌باشد.

در خصوص قسمت DC/DC انواع مختلفی از مبدل‌های سوئیچینگ<sup>۲</sup> وجود دارند که مفصلاً در [۸] به آن‌ها اشاره شده است. در شکل «۲-۳» انواع مختلف مبدل‌های سوئیچینگ آورده شده است که موارد Buck، Boost و Buck-Boost پرکاربردتر آنها هستند. به طور کلی می‌توان به این نکته اشاره کرد که مبدل‌های Buck نسبت به مبدل‌های Boost و Buck-Boost کارایی بالاتری را دارا می‌باشند و لذا بایستی در صورت امکان خروجی قسمت برداشت توان از محیط ولتاژ بالاتری را از ولتاژ مورد نیاز مدار داشته باشد تا بتوان با استفاده از مبدل Buck از بهره‌وری بیشتری آن استفاده نمود.



شکل ۲-۳: مبدل‌های سوئیچینگ [۸]

استفاده از رگلاتورهای خطی<sup>۳</sup> معمول، به غیر از موارد با جریان نشتی بسیار پایین و مصرف کم مدار به دلیل اتلاف بالا توصیه نمی‌گردد.

<sup>1</sup>Solar Panel

<sup>2</sup>Switching Regulator

<sup>3</sup>Linear Regulator

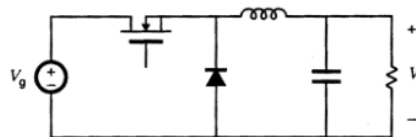


## ۲-۳ روش‌های برداشت توان از محیط

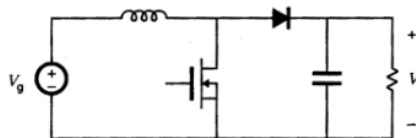
با توجه به محیط کاری یک سیستم و توان در دسترس از پارامترهای مختلف محیطی انواع مختلفی از روش‌های برداشت توان از محیط وجود دارد که هر یک مزایا و معایب مربوط به خود را دارا هستند و هیچ یک از روش‌ها به‌طور مطلق برتری کامل به روش‌های دیگر نداشته و هر یک بنا به شرایط کاری سیستم می‌توانند برای تامین تغذیه سیستم به کار روند.

منابع مختلف جهت برداشت توان از محیط در شکل زیر آورده شده‌اند:

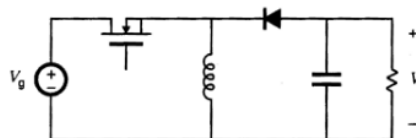
Buck converter



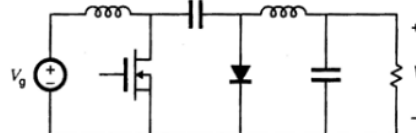
Boost converter



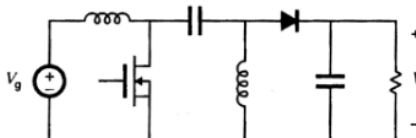
Buck-boost converter



Cuk converter



SEPIC



شکل ۳-۳: منابع مختلف برداشت توان [۹]

در جدول زیر به مقایسه از پارامترهای مختلف هریک از روش‌ها گردآوری شده است و برای هریک میزان چگالی توان و همچنین میزان توان معمول قابل برداشت آورده شده است:

هر یک از روش‌های یاد شده به‌طور خلاصه در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

Power Source	Type	Typical Power Density	Embedded Nominal Power	Transducer
Wind	Mechanical	28.5 mW/cm <sup>2</sup>	47 dBm (50 W)	Wind Turbine
Solar	Electromagnetic	15 mW/cm <sup>2</sup>	42 dBm (15 W)	Solar Panels (Outdoors) (0-200 kLux)
Thermal	Thermal	15 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>	22 dBm (150 mW)	Thermoelectric Generator (TEG)
Vibration	Mechanical	145 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>	19 dBm (74 mW)	Electromagnetic
Mechanical	Mechanical	330 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>	-7 dBm (200 $\mu$ W)	Piezoelectric materials
Mechanical	Mechanical	50 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>	-7 dBm (200 $\mu$ W)	Electrostatic
Microbial	Biochemical	2.6 $\mu$ W/cm <sup>2</sup>	-2 dBm (600 $\mu$ W)	Microbial Fuel Cell
Indoor Lights	Electromagnetic	15 $\mu$ W/cm <sup>2</sup>	-3 dBm (480 $\mu$ W)	Solar Panels (Indoors) (1 Lux-3 kLux)
Directed RF	Electromagnetic	50 mW/cm <sup>2</sup>	20 dBm (100 mW)	Antenna
Acoustic	Mechanical	96 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>	-11 dBm (80 $\mu$ W)	Microphones/Piezoelectric
Ambient RF	Electromagnetic	12 nW/cm <sup>2</sup>	-23 dBm (5 $\mu$ W)	Antenna

Table 3-1: چگالی توان و میزان توان معمول قابل برداشت

### ۱-۲-۳ برداشت انرژی نوری از محیط

در صورت وجود نور با شدت کافی در محل مورد استفاده از سیستم، برداشت توان از محیط با استفاده از سلول‌های خورشیدی یکی از بهترین روش‌ها برای برداشت توان از محیط می‌باشد. دلیل این امر سطح بالاتر توان تولیدی در مقیاس حجم مدار در مقایسه با باقی روش‌ها می‌باشد [۱۷].

نکته مهم در کاربردی سلول‌های خورشیدی حساسیت آن‌ها به نوع نور تابیده شده می‌باشد. در حقیقت برای منابع نوری مختلف سلول‌های نوری با تکنولوژی مختلف وجود دارند که هر یک به طیف خاصی از نور حساس هستند. لذا در صورتی که کاربردی سیستم در محیط سرباز<sup>۴</sup>، است از سلول‌های نوری خاص ساخته شده برای محیط سرباز و در صورتی که کاربردی در محیط سربسته<sup>۵</sup> می‌باشد، از سلول‌های نوری خاص محیط سربسته و حساس به نور مصنوعی بهتر است استفاده شود [۱۷].

به‌طور معمول سلول‌های نوری حساس به نور خورشید توان بیشتری را نسبت به موارد حساس به نور مصنوعی ایجاد می‌کنند. سلول‌های نوری در سائیزها و توان‌های مختلف وجود دارند که با توجه به کاربرد سیستم IoT مورد نظر قابل استفاده هستند.

### ۲-۲-۳ برداشت توان از انرژی مکانیکی محیط

انرژی مکانیکی به صورت لرزش‌ها و یا حرکت‌های اشیا در محیط می‌تواند برای برداشت توان الکتریکی جهت تامین توان سیستم‌های IoT مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی سه روش تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی در برداشت توان از محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از:

<sup>۴</sup>Outdoor

<sup>۵</sup>Indoor

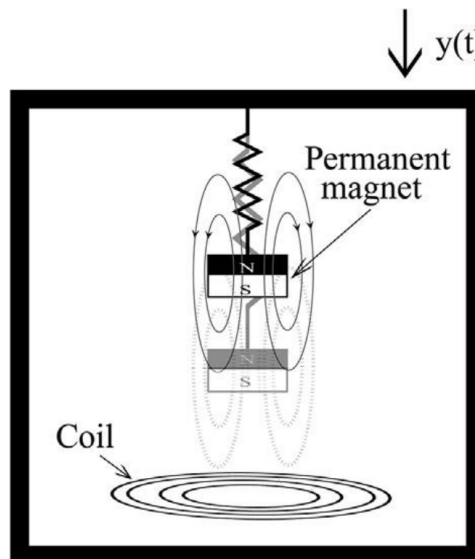
۱. ابزارهای پیزوالکتریک

۲. سیستم‌های الکترومغناطیسی

۳. سیستم‌های الکتروستاتیک

درخصوص تبدیل حرکت خطی به انرژی الکتریکی معمولاً حرکت خطی به یک حرکت دورانی و برگشتی برای تبدیل به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد. به عنوان مثال با باز شدن یک درب، به کمک یک چرخ دنده افزاینده  $90^\circ$  درجه باز شدن درب، به چندین دور تبدیل می‌گردد و این چرخش به یک مبدل الکترومغناطیسی دورانی برای تبدیل به انرژی الکتریکی داده می‌شود.

سیستم‌های الکترومغناطیسی بر مبنای حرکت یک سیم‌پیچ درون یک میدان مغناطیسی و یا برعکس عمل می‌نمایند. این روش در شکل «۳-۴» نمایش داده شده است.



شکل ۳-۴: مبدل الکترومغناطیسی

در مورد تبدیل لرزش به انرژی الکتریکی با توجه به فرکانس آن معمولاً این عمل به صورت مستقیم صورت می‌پذیرد. به این معنی که با اتصال مبدل به عنصر در حال لرزش بخشی از این لرزش به مبدل انتقال می‌یابد و باعث ایجاد پتانسیل الکتریکی در خروجی آن می‌گردد.

علاوه بر روش الکترومغناطیسی، روش‌های الکتروستاتیک و پیزوالکتریک نیز جهت تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی قابل استفاده هستند.

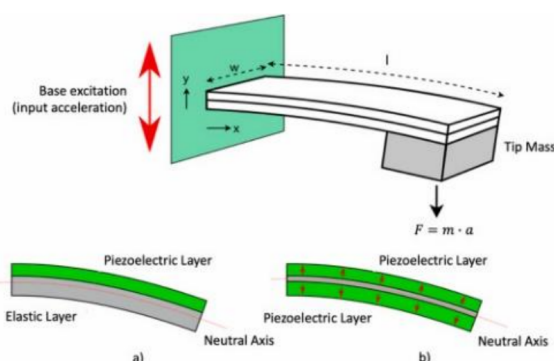
در روش الکتروستاتیک با استفاده از تغییر فاصله و یا موقعیت دو صفحه، ظرفیت خازنی در حضور یک دی‌الکتریک پلاریزه‌کننده تغییر می‌یابد و این تغییر به پتانسیل الکتریکی تبدیل می‌گردد [۱۸].

در روش پیزوالکتریک از یک عنصر با ساختار غیر یکنواخت استفاده می‌شود که با اعمال فشار به آن و



شکل ۳-۵: مبدل‌های الکتروستاتیک

تغییر نظم ساختار اتمی پتانسیل الکتریکی در دو سر آن ایجاد می‌گردد. در شکل زیر این روش نمایش داده شده است:



شکل ۳-۶: مبدل پیزوالکتریک

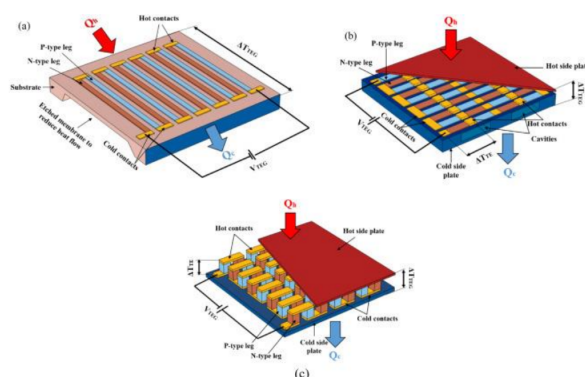
### ۳-۲-۳ تبدیل گرما به انرژی الکتریکی

امکان تبدیل مستقیم انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی با استفاده از مبدل‌های مبتنی بر اثر Seebeck وجود دارد. روش کار این مبدل‌ها استفاده از دو فلز و یا نیمه‌هادی‌های مختلف و قرار دادن آن‌ها در دو دمای مختلف است. از آنجا که ولتاژ ایجاد شده توسط TEG<sup>۶</sup> بسیار کم است لذا این قطعات در تعداد زیاد، به صورت سری با یکدیگر، به صورت الکتریکی قرار می‌گیرند و به این صورت ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد.

نکته مهم اتصال این عناصر به صورت موازی از نظر گرمایی است که کار ساخت آن‌ها را مشکل می‌نماید [۱۷]. روش‌های مختلف ساخت این مبدل‌ها در شکل «۳-۷» آمده است:

برخی مواد خاص با بازدهی بالاتر نسبت به موارد سنتی TEG در حال ساخت و همچنین تحقیق هستند که استفاده از این روش را برای مواردی که سایر روش‌های برداشت توان از محیط امکان پذیر نیست ممکن می‌سازد. به عنوان مثال در [۱۹] و [۲۰] به TEG هایی برای دریافت توان کاری یک سیستم پوشیدنی از بدن انسان اشاره شده است.

<sup>۶</sup>Thermoelectric Generator



شکل ۳-۷: ساختار TEG

### ۴-۲-۳ دریافت توان با استفاده از امواج

در این روش از امواج رادیویی موجود در محیط و یا ایجاد امواج خاص جهت انتقال توان استفاده می‌گردد. در روش اول از امواج مربوط به Wi-Fi، رادیو FM، فرستنده‌های تلویزیونی و ... برای دریافت توان از محیط اطراف استفاده می‌گردد. در این روش با استفاده از انرژی موجود در امواج و دریافت آن‌ها با یک آنتن مناسب و تبدیل آن به انرژی الکتریکی توان مورد نیاز جهت کارکرد سیستم ایجاد می‌گردد.

دو ویژگی جذاب در این روش وجود دارد که یکی وجود امواج در تقریباً تمامی نقاطی که انسان وجود دارد و دیگری امکان ارسال همزمان داده و توان در این روش می‌باشد که به آن <sup>۷</sup>SWIPT نیز گفته می‌شود.

در خصوص ویژگی اول به عنوان مثال می‌توان به Wi-Fi Router ها اشاره کرد که تقریباً در تمامی خانه‌ها وجود دارند و می‌توانند یک منبع توان برای کاربردهای سرپسته باشند. همچنین در کاربردهای سرباز می‌توان از امواج رادیو، تلویزیون و یا شبکه‌های سلولی استفاده کرد. در جدول «۳-۲» مقایسه‌ای از توان در دسترس حدودی که در محیط شهری لندن جمع‌آوری شده است نمایش داده می‌شود:

بایستی توجه داشت که میزان توان در دسترس با فاصله سیستم برداشت توان از فرستنده امواج و بازدهی<sup>۸</sup> آنتن آن رابطه مستقیم دارد که این موضوع در جدول «۳-۳» و «۴-۳» نمایش داده شده است.

<sup>۷</sup>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

<sup>۸</sup>Gain

Band	Frequencies (MHz)	Average $S_{BA}^2$ (nW/cm <sup>2</sup> )	Maximum $S_{BA}^2$ (nW/cm <sup>2</sup> )
DTV (during switch over)	470–610	0.89	460
GSM900 (MTx)	880–915	0.45	39
GSM900 (BTx)	925–960	36	1930
GSM1800 (MTx)	1710–1785	0.5	20
GSM1800 (BTx)	1805–1880	84	6390
3G (MTx)	1920–1980	0.46	66
3G (BTx)	2110–2170	12	240
Wi-Fi	2400–2500	0.18	6

Table 3-2: چگالی انرژی امواج در شهر لندن

Distance (ft)	P ( $\mu$ W)	I ( $\mu$ A)	Recharge Time (hrs)
2	3688	922	62.40
4	1085	271	211.92
6	259	65	888.72
7	86	22	2659.92

Table 3-3: تاثیر فاصله بر میزان انرژی آنتن

در خصوص SWIPT تحقیقات زیادی انجام پذیرفته است و تحقیقات بسیاری نیز در دست انجام است [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]. در SWIPT از آنجا که عملکرد مدارات دریافت کننده اطلاعات و توان از موج RF ورودی متفاوت است، این موج معمولاً در دو مسیر متفاوت مورد استفاده قرار می گیرد و هر یک عملکرد خاص خود را انجام می دهند. این موضوع در شکل «۳-۸» نمایش داده شده است.

یکی از قدیمی ترین موارد استفاده شده SWIPT کارت ها و تگ های RFID<sup>۹</sup> و NFC<sup>۱۰</sup> هستند که ساختار آن ها در شکل «۳-۹» نمایش داده شده است [۲۴]. این تکنولوژی ها به مدت طولانی در حال استفاده هستند اما برد و توان انتقالی آن ها محدود می باشد.

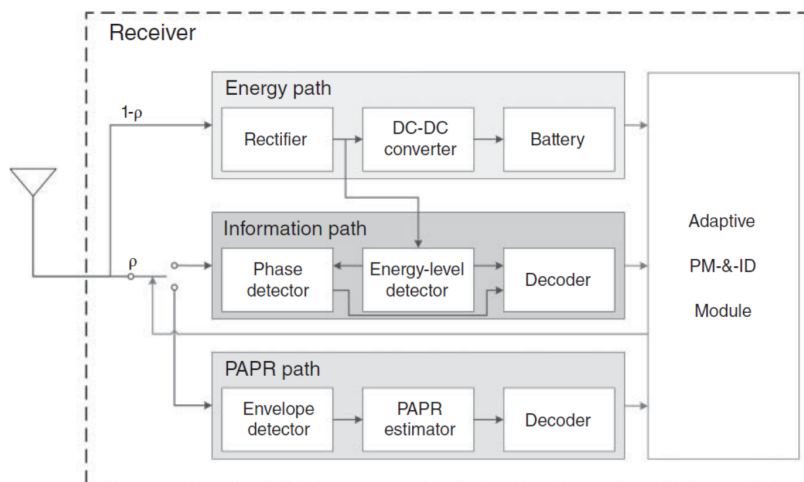
تکنولوژی Qi نیز روشی برای انتقال توان با نسبت زیاد، در فواصل کوتاه می باشد که به طور تجاری در شارژر

<sup>۹</sup>Radio Frequency Identification

<sup>۱۰</sup>Near-Field Communication

Distance (ft)	P ( $\mu$ W)	I ( $\mu$ A)	Recharge Time (hrs)
2	16115	4029	14.16
4	3070	768	74.88
6	1551	388	148.30
8	810	203	283.90
10	366	92	627.60
12	93	23	2475.00
13	26	7	8750.00

Table 3-4: تاثیر نوع آنتن بر انرژی جذب شده (آنتن جهت دار)



شکل ۳-۸: دیاگرام داخلی یک سیستم SWIPT

لوازم قابل حمل خصوصاً تلفن‌های همراه استفاده می‌گیرد.

روش‌های دیگری همچون MIMO Based Power Transfer<sup>۱۱</sup> برای انتقال توان در کانون توجه هستند که در آن‌ها قابلیت SWIPT نیز قابل پیاده‌سازی می‌باشد. این موضوع در [۲۳] و [۲۴] اشاره شده است. در برخی پژوهش‌های جدید به استفاده از 5G برای مصرف SWIPT اشاره شده است [۲۵]. در این راستا طراحی موسوم به Rectenna برای استفاده برای برداشت توان خصوصاً در فرکانس‌های بالا که محدودیت‌های یکسوسازهای مرسوم و وجود دارد، بسیار نویدبخش است. یک نمونه ساده از این مدل طراحی در شکل «۳-۱۰» زیر آورده شده است.

طراحی Rectenna با قیمت ساخت پایین و همچنین توانایی خروجی مستقیم DC که چالش بزرگی در

<sup>11</sup>Multiple-Input and Multiple-Output





مورد استفاده در مدار می‌گردد و اثرات تغییر میزان انرژی ورودی به سیستم را تا حد زیادی خنثی می‌نماید. در جدول زیر انواع مختلف عناصر ذخیره‌ساز از نوع باتری با یکدیگر مقایسه شده‌اند [۱].

Type	Rated Voltage (V)	Capacity (Ah)	Temperature Range (°C)	Cycling Capacity (-)	Specific Energy (Wh/kg)
Lead-Acid	2	1.3	-20 to 60	500-1000	30-50
MnO <sub>2</sub> Li	3	0.03-5	-20 to 60	1000-2000	280
Li poly-carbon	3	0.025-5	-20 to 60	-	100-250
LiSOCl <sub>2</sub>	3.6	0.025-40	-40 to 85	-	350
LiO <sub>2</sub> S	3	0.025-40	-60 to 85	-	500-700
NiCd	1.2	1.1	-40 to 70	10,000-20,000	50-60
NiMH	1.2	2.5	-20 to 40	1000-20,000	60-70
Li-Ion	3.6	0.74	-30 to 45	1000-100,000	75-200
MnO <sub>2</sub>	1.65	0.617	-20 to 60	-	300-610

Table 3-5: مقایسه باتری‌ها [۱]

بایستی توجه داشت که در جدول فوق موارد Lead-Acid، NiMH، NiCd و Li-Ion قابل شارژ مجدد هستند که در میان آن‌ها باتری‌های Li-Ion به دلیل دارا بودن چگالی ظرفیت بالاتر و همچنین میزان دشارژ ذاتی کمتر در اکثر کاربردها به باقی موارد ترجیح داده می‌شوند. همچنین باتری‌های Lead-Acid به دلیل سایز بزرگ و وزن زیاد استفاده چندانی در سیستم‌های IoT ندارند. مشخصات این باتری‌ها در جدول «۳-۶» آمده است:

Type	Cycle Life	Charge Time	Self-discharge/Month	Voltage (V)	Capacity (mAh)	Energy (Wh)	Price (USD)
NiMH	300-500	2-4H	30%	1.25	2500	3.0	60
Li-Ion	500-1000	2-4H	10%	3.6	730	2.7	100
LiPo	300-500	2-4H	10%	3.6	930	3.4	100

Table 3-6: مقایسه باتری‌های قابل شارژ سیستم‌های IoT [۲]

امکان استفاده از انواع باتری‌های غیر قابل شارژ نیز در سیستم‌های مبتنی بر برداشت انرژی از محیط وجود دارد. در این حالت این باتری‌ها در جهت ایجاد یک منبع پشتیبان در صورت عدم وجود انرژی کافی برای شارژ باتری‌های قابل شارژ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت به باتری غیر قابل شارژ باتری Primary نیز گفته می‌شود.

نوع دیگر ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی پرکاربرد در سیستم‌های IoT ابر خازن‌ها هستند که دارای ظرفیت ذخیره‌سازی کمتری نسبت به باتری در سایز مشابه می‌باشند و همچنین میزان دشارژ ذاتی بالایی را دارا هستند، اما دارای ویژگی مثبت تعداد شارژ و دشارژ بسیار بالا و توانایی کار در محدوده دمایی گسترده می‌باشند. مشخصات چند نمونه از این ابر خازن‌ها در جدول «۳-۷» آمده است:

Supercapacitor	Life Cycle (-)	Specify Energy (Wh/kg)	Operating Temperature (°C)	Cell Voltage (V)
Maxwell PC10	500,000	1.4	-40 to 70	2.50
Maxwell BCAP0350	500,000	5.1	-40 to 70	2.50
Green-cap EDLC	>100,000	1.47	-40 to 60	2.70
EDLC SC	1,000,000	3-5	-40 to 65	2.70
Pseudo SC	100,000	10	-40 to 65	2.3-2.8
Hybrid SC	500,000	180	-40 to 65	2.3-2.8

Table 3-7: مشخصات چند ابرخازن نمونه [۱]

ابرخازن‌ها می‌توانند به صورت ترکیبی با انواع دیگر ذخیره‌سازها مورد استفاده قرار گیرند و سیستم نهایی از مزایای هر دو بهره‌برداری نماید. در جدول زیر مقایسه‌ای از باتری‌ها و ابرخازن‌ها آمده است: [۲]

Energy Storing Device	Advantages	Limitations
Super-capacitor	<p>Much higher recharge cycle life</p> <p>High cycle efficiency (&gt;95%)</p> <p>Much longer lifetime compared to batteries</p> <p>Environmentally friendly</p> <p>Broader range of voltage and current</p> <p>Low internal resistance</p> <p>High performance in low temperatures</p>	<p>Expensive</p> <p>Low energy per unit weight</p> <p>Low per cell voltage</p> <p>High self-discharge rate</p> <p>High dielectric absorption</p>
Rechargeable battery	<p>Inexpensive</p> <p>Low self-discharge rate</p> <p>High energy per unit weight</p>	<p>Lower recharge cycle life</p> <p>Much lower lifetime</p>

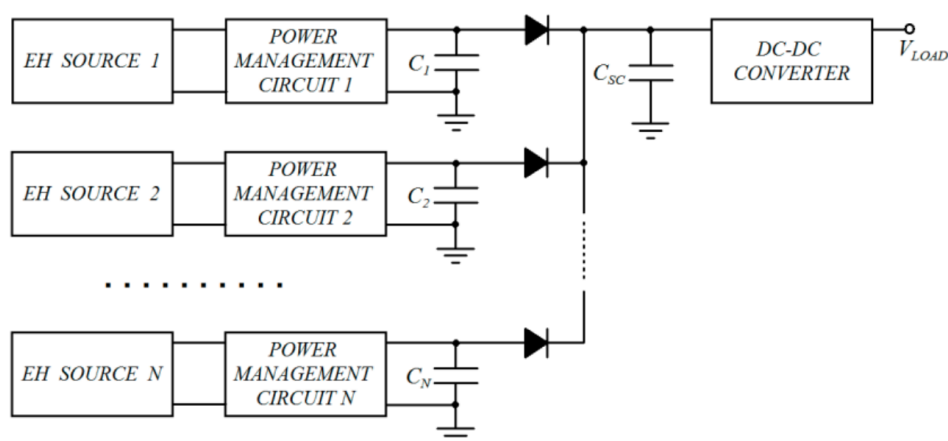
Table 3-8: مقایسه ابرخازن‌ها و باتری‌های قابل شارژ [۲]

برخی روش‌های خاص برای تامین توان وجود دارد که به علت مصرف خاص و یا قیمت بالا چندان کاربردی

به صورت عام ندارند. به عنوان مثال باتری‌های  $^{14}\text{RTG}$  با استفاده از تبدیل انرژی حرارتی ناشی از واپاشی خود به خودی یک عنصر رادیواکتیو به الکتریسیته عمل می‌نمایند. این باتری‌ها عمر و توان نسبتاً زیادی دارند اما مصرف آن‌ها در حد کارهای خاص نظامی و هوافضا باقی مانده است.

### ۴-۳ ترکیب چند روش دریافت توان از محیط

امکان ترکیب چند روش دریافت توان از محیط به سادگی وجود دارد و برخی از مدارات مبدل نیز از این ویژگی پشتیبانی می‌کنند در این حالت در صورت عدم وجود یک منبع توان در محیط، عنصر ذخیره کننده توسط منبع توان دیگری مورد شارژ قرار می‌گیرد. این موضوع در مقاله [۲] اشاره شده است و در شکل زیر نیز این روش ارائه شده است [۱۷].



شکل ۱۱-۳: دریافت انرژی از چند منبع

<sup>14</sup>Radioisotope Thermoelectric Generator

## فصل ۴

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به مقالات بررسی شده، و همچنین با در نظر گرفتن سرعت بالای نفوذ ابزارهای IoT به زندگی انسان که در اکثر موارد به منبع توان پایدار و دسترسی نداشته‌اند، استفاده از روش‌های مختلف در جهت کاهش توان مصرفی سیستم‌های پردازشی و غیر پردازشی در ابزارهای IoT الزامی به نظر می‌رسد. در این میان پیشرفت‌های فراوانی در حوزه مخابرات کم توان و همچنین ساخت سیستم‌های پردازشی با میزان توان استاتیک پایین انجام شده است. اما در خصوص نحوه انجام محاسبات و پردازش‌های داخل سیستم، با ظهور AI و نیاز به انجام برخی پردازش‌های سنگین، در داخل پردازنده با توان پایین، نیاز به اصلاح روش‌های کنونی پردازش احساس می‌گردد. در برخی موارد این امر با اضافه نمودن بخش‌های شتاب‌دهنده اختصاصی و یا همه منظوره در داخل تراشه انجام پذیرفته است اما بازهم فاصله زیادی با توان هدف برای انجام یک پردازش مشخص وجود دارد. در این خصوص برخی پژوهش‌ها در زمینه سیستم‌های Event-Driven در جریان است که بتوان با کمک آن‌ها توان مصرفی را تا حد ممکن کاهش داد. در خصوص منابع توان و همچنین ذخیره‌سازی توان نیز پیشرفت‌هایی صورت گرفته است، اما سرعت این پیشرفت‌ها و همچنین هزینه اجرای انجام آن‌ها هنوز تا استفاده نهایی در محصولات تجاری فاصله زیادی دارد و اکنون اکثر محصولات روزمره با توان پردازشی بالا نیازمند شارژ روزانه هستند. ترکیب ایجاد پردازش‌های کم مصرف و قدرت پردازش و روش‌های انتقال اطلاعات کم مصرف و با قابلیت اطمینان بالا، منابع توان با ظرفیت مناسب و قابلیت برداشت توان از محیط راه را برای ایجاد سیستم‌های IoT هوشمندتر بدون نیاز به شارژ مجدد و با قابلیت کارکرد تا چندین سال بدون نیاز به تعمیر و یا تعویض را فراهم می‌آورد. در صورت وجود این موارد زندگی بشر با کمک این لوازم متحول خواهد شد و راه برای استفاده بهتر از منابع در دسترس بشر هموارتر خواهد شد.

# Bibliography

- [1] M. Prauzek, J. Konecny, M. Borova, K. Janosova, J. Hlavica, and P. Musilek. Energy harvesting sources, storage devices and system topologies for environmental wireless sensor networks: A review. *Sensors*, 18(8):2446, 2018.
- [2] F. Deng, X. Yue, X. Fan, S. Guan, Y. Xu, and J. Chen. Multisource energy harvesting system for a wireless sensor network node in the field environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(1):918–927, 2019.
- [3] M. Capra, R. Peloso, G. Masera, M. Ruo Roch, and M. Martina. Edge computing: A survey on the hardware requirements in the internet of things world. *Future Internet*, 11(4):100, 2019.
- [4] A. El Hakim. Internet of things (iot) system architecture and technologies. *White Paper*, 10, 2018.
- [5] A. Taivalsaari and T. Mikkonen. A taxonomy of iot client architectures. *IEEE Software*, 35(3):83–88, 2018.
- [6] Stm32l552re. [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-ultra-low-power-mcus/stm32l5-series/stm32l5x2/stm32l552re.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-ultra-low-power-mcus/stm32l5-series/stm32l5x2/stm32l552re.html). Accessed: 2020-07-11.
- [7] H. Elahi, K. Munir, M. Eugeni, S. Atek, and P. Gaudenzi. Energy harvesting towards self-powered iot devices. *Energies*, 13(21):5528, 2020.
- [8] B. Briones. Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering. *The Charleston Advisor*, 21:51–54, 2019.
- [9] B. Maamer, A. Boughamoura, A. M. Fath El-Bab, L. A. Francis, and F. Tounsi. A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes. *Energy Conversion and Management*, 199:111973, 2019.

- [10] B. K. Kanaujia, N. Singh, and S. Kumar. *Rectenna: Wireless Energy Harvesting System*. Springer, 2021.
- [11] A. Paidimarri and A. P. Chandrakasan. A wide dynamic range buck converter with sub-nw quiescent power. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 52(12):3119–3131, 2017.
- [12] R. Chéour, S. Khriji, M. abid, and O. Kanoun. Microcontrollers for iot: Optimizations, computing paradigms, and future directions. In *2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 1–7, 2020.
- [13] J. L. Hennessy and D. A. Patterson. *Computer Architecture, Sixth Edition: A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2017.
- [14] L. Baldanzi, L. Crocetti, S. Di Matteo, L. Fanucci, S. Saponara, and P. Hameau. Crypto accelerators for power-efficient and real-time on-chip implementation of secure algorithms. In *2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, pages 775–778, 2019.
- [15] V. Mangal and P. R. Kinget. Sub-nw wake-up receivers with gate-biased self-mixers and time-encoded signal processing. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 54(12):3513–3524, 2019.
- [16] R. A. Kjellby et al. Self-powered iot device based on energy harvesting for remote applications. In *2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pages 1–4, 2018.
- [17] M. Grossi. Energy harvesting strategies for wireless sensor networks and mobile devices: a review. *Electronics*, 10(6):661, 2021.
- [18] S. Boisseau, G. Despesse, and B. A. Seddik. Electrostatic conversion for vibration energy harvesting. In *Small-Scale Energy Harvesting*. IntechOpen, London, United Kingdom, 2012.
- [19] C. Xia, D. Zhang, W. Pedrycz, K. Fan, and Y. Guo. Human body heat based thermoelectric harvester with ultra-low input power management system for wireless sensors powering. *Energies*, 12(20):3942, 2019.
- [20] Y. Xin, J. Zhou, and G. Lubineau. A highly stretchable strain-insensitive temperature sensor exploits the seebeck effect in nanoparticle-based printed circuits. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(42):24493–24501, 2019.

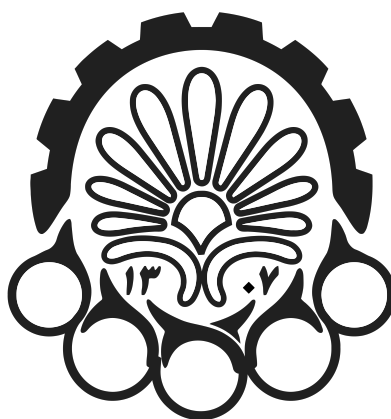
- [21] K. W. Choi et al. Simultaneous wireless information and power transfer (swipt) for internet of things: Novel receiver design and experimental validation. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(4):2996–3012, 2020.
- [22] X. Liu, X. Yang, D. Ma, N. Jin, X. Lai, and H. Tang. A novel simultaneous wireless information and power transfer system. In *2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, pages 212–215, 2019.
- [23] T. D. P. Perera, D. N. K. Jayakody, S. K. Sharma, S. Chatzinotas, and J. Li. Simultaneous wireless information and power transfer (swipt): Recent advances and future challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(1):264–302, 2017.
- [24] D. W. K. Ng, T. Q. Duong, C. Zhong, and R. Schober, editors. *Wireless information and power transfer: theory and practice*. John Wiley Sons, 2019.
- [25] A. Eid, J. Hester, and M. Tentzeris. 5g as a wireless power grid. *Sci Rep*, 11:636, 2021.
- [26] K. Shafique et al. Energy harvesting using a low-cost rectenna for internet of things (iot) applications. *IEEE Access*, 6:30932–30941, 2018.
- [27] M. U. Hoque, D. Kumar, Y. Audet, and Y. Savaria. Design and analysis of a 35 ghz rectenna system for wireless power transfer to an unmanned air vehicle. *Energies*, 15(1):320, 2022.

## **Abstract**

In today's world, the discussion of IoT is one of the growing issues in human life. The speed of this growth has been particularly significant in recent years, and it is predicted that this progress will continue with even greater strides in the future. The issue of power and energy in IoT systems is one of the important issues in the proper use of them. Many IoT applications in various industries, due to the issue of power supply required for operation, despite the existence of solutions for other challenges, have not yet been commercially introduced to the market. By solving the power supply issue, a large market awaits IoT devices. This topic has been examined in this research by leveraging recent studies and articles, comparing different power supply models, and using energy harvesting methods from the environment.

**Keywords:** Internet of Things, Low Power Systems, Environmental Energy Harvesting, Energy Storage, Energy Conversion





Amirkabir University of Technology

(Tehran Polytechnic)

Department of Computer Engineering

Embedded Systems Final Research Report Thesis

# **Energy Management in Wireless Sensor Networks Using Environmental Energy Harvesting Technologies**

By:

**Reza Adinepour**

Supervisor:

**Prof. Sedighi**

Jul 2024