

# طراحی و پیاده سازی فیلتر دیجیتال میان گذر توسط میکروکنترلرهای خانواده AVR

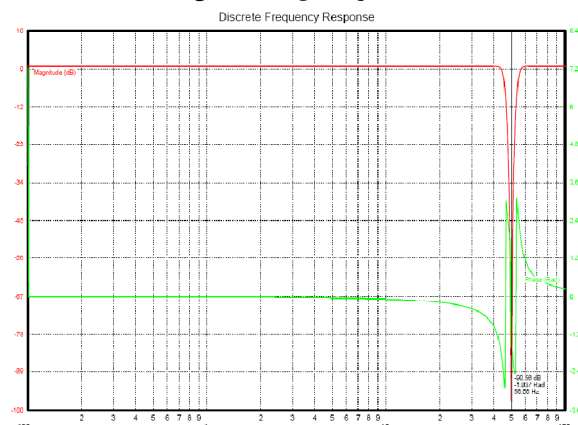
میثاق سیدرانی  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
[Misi2200@Yahoo.com](mailto:Misi2200@Yahoo.com)

فرید علیدوست اقدام  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
[Info@faridonline.ir](mailto:Info@faridonline.ir)

چکیده - در این مقاله به معرفی روش های طراحی و پیاده سازی فیلترهای دیجیتال می پردازیم. فیلترهای میان گذر و محدود کننده باند بدلیل اینکه اصولاً تنها بخش کوچکی از پهنای باند دارای تداخل را پردازش می کنند ، ابزاری مطمئن برای بکارگیری در کاربردهای باند پهن می باشند. امروزه با ظهور پردازش دیجیتالی سیگنال ، پیاده سازی فیلترهایی که باند فرکانسی و تضعیف در آنها بصورت دینامیک کنترل می شود ، ممکن شده است. فیلترهای دیجیتال کاربرد گسترده ای در سیستم های نظامی ، پزشکی و سیستم های چند رسانه ای دیجیتال و ... پیدا کرده اند. در این مقاله ابتدا به معرفی روش های مختلف طراحی فیلتر دیجیتال پرداخته و در پایان با استفاده از امتد طراحی فیلترهای FIR ، یک فیلتر میان گذر درجه ۲ با فرکانس مرکزی 50Hz و باند ممنوعه 10Hz برای استفاده در سیستم های پزشکی طراحی شده و توسط تبدیل معکوس Z ، تابع تبدیل گسسته فیلتر دیجیتال برای پیاده سازی بر روی میکروکنترلر بدست می آید ، در نهایت شبیه سازی این فیلتر توسط دو نرم افزار Proteus و Labview انجام شده و نتایج داخل یک فایل عرضه شده است.

کلیدواژه- FIR, IIR , FFT,ADC

۱- نمایش داده شده است . (Notch) 50Hz در شکل-۱



شکل ۱: پاسخ فاز (منحنی سبز-پائین) و فرکانس (منحنی قرمز-بالا) یک فیلتر میان گذر با فرکانس مرکزی 50Hz

## ۱- مقدمه

یک فیلتر دیجیتال در واقع یک فیلتر الکترونیکی است که با اجرای عملیات دیجیتال ریاضی بر روی سیگنال ورودی ، عمل می کند. این فیلترها در تباین با فیلترهای آنالوگ می باشند که کاملاً در حوزه آنالوگ کار می کنند و از شبکه هایی فیزیکی از اجزاء الکترونیکی (مانند مقاومت ، خازن ، سلف و ترانزیستور و ...) برای دست یابی به فیلتر مطلوب بهره می برند. فیلترهای دیجیتال بطور واقعی می توانند هرگونه فیلتری را بر اساس تابعی ریاضی یا یک الگوریتم اجرا نمایند. دو محدودیت اساسی فیلترهای دیجیتال ، سرعت و قیمت آنها می باشد. (بطوریکه فیلتر نمی تواند سریعتر از پردازنده مرکزی فیلتر عمل نماید) با این وجود قیمت مدارهای مجتمع رور به روز در حال کاهش است. فیلترهای دیجیتال بطور فزاینده ای در حال استفاده می باشند و امروزه یک جزء اساسی برای بسیاری از لوازم روزمره مانند رادیو ، تلفن های همراه ، گیرنده های استریو و ... می باشد. امروزه در سیستم های نوین اندازه گیری پزشکی مانند ECG و EEG بدلیل ضعیف بودن سیگنال و تداخل فرکانس برق شهر بر روی آنها ، عملاً لزوم استفاده از فیلترهای دیجیتال به یک واقعیت غیر قابل انکار تبدیل شده است. پاسخ فاز و فرکانسی یک فیلتر میان گذر

## ۲- مقایسه فیلترهای دیجیتال و آنالوگ

### ۲-۱- مزایا

فیلترهای دیجیتال قابلیت دستیابی عملی به مشخصه هایی را دارند که از طریق فیلترهای آنالوگ قابل دسترسی نمی باشند. برای مثال ، ساخت یک فیلتر پائین گذر 1000Hz که اجازه عبور مؤلفه 999Hz و حذف مؤلفه 1001Hz از سیگنال ورودی در حوزه دیجیتال کاملاً عملی می باشد. در حالی که فیلترهای آنالوگ واقعی نمی توانند بین مؤلفه های فرکانسی نزدیک بهم چنین تمایزی را قائل شوند. فیلترهای

### ۳-۱- تبدیل آنالوگ به دیجیتال

داده آنالوگ نمی تواند بصورت مستقیم وارد یک سیستم دیجیتال شود. بلکه ابتدا بایستی به فرم دیجیتال تبدیل شود. نمونه هایی از سیگنال آنالوگ در بازه های زمانی گسسته گرفته می شود و به معادل دیجیتال تبدیل می گردد. معادل دیجیتال در واقع یک نمایش باینری از سیگنال ورودی در همان لحظه می باشد. اغلب مبدل های آنالوگ به دیجیتال در ازای یک ولتاژ آنالوگ ورودی توانایی تولید یک داده باینری ۸ تا ۱۶ بیت را دارا می باشند. برای اینکه نمونه برداری بصورت صحیح انجام بگیرد ، فرکانس نمونه برداری بایستی حداقل از دو برابر بیشینه فرکانس ورودی بیشتر باشد. مثلا در سیستم تلفن که پهنای باند معمولا با 3.4Khz محدود می گردد سیگنال ها با 8Khz نمونه برداری می شوند. این بدان معناست که فرکانس های بالای 4Khz بایستی تا زیر سطح نویز تضعیف شوند. که برای رسیدن به این مقصود هم بایستی از یک فیلتر با پاسخ فرکانسی تیز در محدوده فرکانس قطع استفاده شود.

### ۳-۲- نمونه برداری پائین تر از نرخ نایکوئیست

این شرایط هنگامی رخ می دهد که فرکانس نمونه برداری پائین تر از دو برابر بیشینه فرکانس ورودی آنالوگ باشد. نمونه برداری زیر نرخ نایکوئیست ، سیگنال دلخواه باند عبور را با سیگنال های ناخواسته در همسایگی باند عبور میکس می کند که پس از میکس شدن ، با هیچ فیلتری قابل جداسازی نمی باشد.

### ۳-۳- نمونه برداری بیش از حد

این شرایط در هنگام نمونه برداری با نرخ بسیار بالاتر از فرکانس بالا رخ می دهد. نمونه برداری بیش از حد باعث کاهش اعوجاج می شود. هرچند با تولید نمونه های بیشتر پردازنده می بایست داده های بیشتری را پردازش نماید که این عمل باعث کاهش توانایی پردازنده برای انجام سایر وظایف شده و نیاز به استفاده از پردازنده های سریعتر پیدا می کنیم.

دیجیتال قابلیت دستیابی به میزان سیگنال به نویز بیشتری نسبت به فیلترهای آنالوگ را مهیا می سازند ، بدلیل اینکه نویز تصادفی تنها در هنگام تبدیل آنالوگ به دیجیتال (ADC) می تواند وارد فیلتر دیجیتال شود ، در حالی که در فیلترهای آنالوگ چند طبقه ، نویز تصادفی در هر طبقه به سیستم تزریق می شود که می تواند باعث بروز خطا و در نهایت پاسخ نامطلوب فیلتر گردد.

### ۲-۲- معایب

مبدل آنالوگ به دیجیتال باعث بروز خطای تدریجی می گردد که بر اثر محدودیت های محاسباتی و ذخیره دیجیتالی سیگنال می باشد. این موضوع همچنین محدودیت نرخ نمونه برداری را شامل می شود که بطور کلی (طبق نظریه نمونه برداری نایکوئیست) کمتر از فیلترهای آنالوگ می باشد.

### ۳- مبنای فیلترهای دیجیتال [1]

بسیاری از فیلترهای دیجیتال بر پایه تبدیل FFT می باشند ، یک الگوریتم ریاضی که به سرعت طیف فرکانسی سیگنال ورودی را استخراج می کند ، که در این مرحله می توان طیف فرکانسی سیگنال ورودی را مورد دستکاری قرار داد(برای مثال ساخت فیلترهای میان گذر) و سپس طیف دستکاری شده را به سیگنال حوزه زمان گسسته تبدیل کرد. تابع تبدیل برای یک فیلتر دیجیتال خطی را می توان بصورت یک تبدیل در حوزه Z با معادله (۱) نمایش داد:

$$H(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_N Z^{-N}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_M Z^{-M}} \quad (1)$$

بطوریکه M درجه فیلتر می باشد. این فرم از تابع تبدیل مخصوص فیلتر بازگشتی است که در نهایت منجر به خاصیت IIR (پاسخ ضربه نامحدود) می شود. اما اگر مخرج دارای عبارت واحد باشد ، در اینصورت به این فرم تابع تبدیل ، فیلتر FIR (پاسخ ضربه محدود) گفته می شود. فرم دیگر یک فیلتر دیجیتال ، مدل فضای حالت آن می باشد. یک فیلتر فضای حالت مرسوم ، فیلتر Kalman می باشد که در سال ۱۹۶۰ توسط Rudolf Kalman منتشر شده است.

### ۳-۴ - تصحیح نرخ نمونه برداری با استفاده از روش درون یابی و چند یک کشی [2]

اگر در یک پروسه نیاز به تولید خروجی دیجیتال با نرخ 48Khz داشته باشیم و حداکثر نرخ نمونه برداری مبدل موجود 24Khz باشد، می توانیم از درون یابی استفاده کنیم. بدین صورت که داده های اضافی می بایست مابین داده های دریافتی مبدل از ورودی قرار بگیرند. نمونه های اضافی بصورت نرم افزاری در واقع میانگینی از داده قبلی و داده بعدی بوده و ما بین آنها قرار می گیرد. با افزودن داده میانگین بین داده های اصلی، سیگنال خروجی از مبدل تصحیح شده و بدین ترتیب می توان با استفاده از سخت افزار سطح پائین و جبران نرم افزاری، عملکرد سیستم را بهبود بخشید.

به همین ترتیب روشی برای حذف داده های اضافی، یا پائین آوردن نرخ نمونه برداری با استفاده از روش یک ده کشی (Decimation) وجود دارد. برای مثال از این روش برای حذف یک محدوده فرکانسی نزدیک به محدوده فرکانسی دلخواه در سیگنال ورودی استفاده می شود. از این دو روش در تقویت کننده های صوتی دیجیتال برای تقویت یا حذف محدوده خاص فرکانسی از سیگنال ورودی بوفور استفاده می شود.

### ۳-۵ - تبدیل تابع تبدیل به معادله تفاضلی [3]

در سیستم های گسسته، فیلتر دیجیتال معمولاً توسط تبدیل تابع تبدیل به یک معادله تفاضلی خطی با ضرایب ثابت (LCCD) توسط تبدیل  $Z$  پیاده سازی می شود. تابع تبدیل گسسته حوزه فرکانس بصورت نسبت دو چند جمله ای نوشته می شود. (برای مثال: معادله (۲))

$$H(Z) = \frac{(Z+1)^2}{(Z-1)(Z+\frac{3}{4})} \quad (2)$$

$$H(Z) = \frac{Z^2+2Z+1}{Z^2+\frac{1}{4}Z-\frac{3}{8}}$$

با تقسیم بر بزرگترین درجه  $Z$ ، معادله (۳) حاصل می شود:

$$H(Z) = \frac{1+2Z^{-1}+Z^{-2}}{1+\frac{1}{4}Z^{-1}+\frac{3}{8}Z^{-2}} = \frac{Y(Z)}{X(Z)} \quad (3)$$

ضرایب مخرج ( $a_k$ ) در واقع ضرایب Feed-Backward و ضرایب صورت ( $b_k$ ) در واقع ضرایب Feed-Forward

باشند. در نتیجه معادله تفاضلی خطی بصورت معادله (۴) بدست می آید:

$$y[n] = -\sum_{k=1}^N a_k y[n-k] + \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] \quad (4)$$

یا بصورت:

$$y[n] = x[n] + 2x[n-1] + x[n-2] - \frac{1}{4}y[n-k] + \frac{3}{8}y[n-k] \quad (5)$$

معادله (۵)، نحوه محاسبه خروجی  $y[n]$  را بر حسب خروجی های قبلی  $y[n-p]$ ، ورودی کنونی  $x[n]$  و ورودی های قبلی  $x[n-p]$  نشان می دهد. [4]

### ۴ - روشهای طراحی فیلترهای دیجیتال [5]

دو گونه ساختار برای طراحی فیلترهای دیجیتال وجود دارد:

پاسخ ضربه نامحدود (IIR)

پاسخ ضربه محدود (FIR)

بر اساس پاسخ سیستم به تابع ضربه واحد، تعریف می شوند. فیلترهای IIR اغلب بصورت ساختار بازگشتی (فیدبک) اجرا می شوند، در حالی که فیلترهای FIR معمولاً نیاز به فیدبک ندارند. در طراحی فیلترهای IIR، رایج ترین شیوه استفاده از تبدیل دو خطی می باشد. در این شیوه، طراحی با استفاده از تابع تبدیل یک فیلتر آنالوگ آغاز شده و سپس نگاشتی از حوزه  $S$  به حوزه  $Z$  انجام می شود. برای نگاشت از حوزه  $S$  به حوزه  $Z$  از معادله (۶) استفاده می شود:

$$S = \frac{2}{T} \left( \frac{1-Z^{-1}}{1+Z^{-1}} \right) \quad (6)$$

این نگاشت، فرم کلی یک فیلتر IIR را با تعداد دلخواهی از صفر و قطب ها نتیجه می دهد (معادله (۷))

$$H(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)} = \frac{\sum_{n=0}^M b_n Z^{-n}}{\sum_{n=0}^N a_n Z^{-n}} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_M Z^{-M}}{a_0 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_N Z^{-N}}, a_0 = 1$$

$$y[n] = \sum_{m=0}^M b_m x(n-m) - \sum_{m=0}^M a_m y(n-m) \quad (7)$$

فیلتر FIR دارای معادله تفاضلی (۸) می باشد:

$$y[n] = \sum_{m=0}^{M-1} b_m x(n-m) \quad (8)$$

#### ۵- فیلتر میان نگذر

یک فیلتر دیجیتال ساده را می توان بصورت زیر پیاده سازی کرد:

الف) پیدا کردن صفرهایی روی دایره واحد در صفحه  $Z$  جهت رد کردن فرکانس های تداخل کننده از معادله (۹) زیر:

$$Zeros = radius * \exp(2\pi i \left(\frac{F_{int}}{F_s}\right)) \quad (9)$$

بطوریکه  $F_{int}$  فرکانس تداخل و  $F_s$  فرکانس نمونه برداری از ورودی می باشد.

ب) پیدا کردن مزدوج مختلط صفرهای حاصل از بخش "الف"

پ) انتخاب تعداد مناسبی قطب جهت استقرار در مبدا

ت) اعمال تبدیل معکوس  $Z$  جهت یافتن پاسخ ضربه ، تا ضرایب فیلتر را نتیجه دهد.

ث) اعمال یک ضریب جهت اطمینان از بیشینه بهره 0dB

با استفاده از دستورالعمل فوق تابع تبدیل فیلتر میان گذر 50Hz با باند توقف 10Hz و فرکانس نمونه برداری 500Hz در حوزه فرکانس بصورت معادله (۱۰) و در حوزه زمان گسسته بصورت معادله (۱۱) بدست آمده است:

$$H(Z) = \frac{0.9408Z^2 - 1.522Z + 0.9408}{Z^2 - 1.522Z + 0.8816} \quad (10)$$

$$H(Z) = \frac{0.9408 - 1.522Z^{-1} + 0.9408Z^{-2}}{1 - 1.522Z^{-1} + 0.8816Z^{-2}} = \frac{Y(Z)}{X(Z)}$$

$$y[n] = 0.9408x[n] - 1.522x[n-1] + 0.9408x[n-2] + 1.522y[n-1] - 0.8816y[n-2] \quad (11)$$

$$y[n] = \frac{588}{625}x[n] - \frac{761}{500}x[n-1] + \frac{588}{625}x[n-2] + \frac{761}{500}y[n-1] - \frac{551}{625}y[n-2]$$

#### ۶- پیاده سازی فیلتر دیجیتال توسط میکروکنترلر

##### ۶-۱- انتخاب میکروکنترلر مناسب

اولین مسئله مهم جهت پیاده سازی فیلتر دیجیتال میان نگذر مبدل آنالوگ به دیجیتال می باشد. اغلب میکروکنترلرهای خانواده AVR مجهز به مبدل آنالوگ به دیجیتال داخلی ۱۰ بیتی می باشند ، لذا جهت پیاده سازی فیلتر دیجیتال میان نگذر مورد بحث از میکروکنترلر ATTiny26 استفاده کرده ایم. این میکروکنترلر دارای ۱۱ ورودی ADC تک پایانه ای و ۷ ورودی ADC تفاضلی با بهره قابل تنظیم ۱ و ۲۰ می باشد. [6] با توجه به اینکه مبدل های آنالوگ به دیجیتال به تغییرات ولتاژ تغذیه بسیار حساس هستند ، بهتر است راهکارهایی که در بخش بعدی توصیه گردیده ، رعایت شوند.

##### ۶-۲- راهکارهای کاهش نویز در مبدل [6]

مدارهای دیجیتال داخلی و خارجی میکروکنترلر ATTiny26 تداخل الکترومغناطیسی (EMI) تولید می کنند که ممکن است روی دقت و صحت عملکرد اندازه گیری تاثیر بگذارد. برای کاربردهایی که نیاز به دقت بالا می باشد ، می توان سطح نویز را توسط اعلان تکنیک های ذیل کاهش داد:

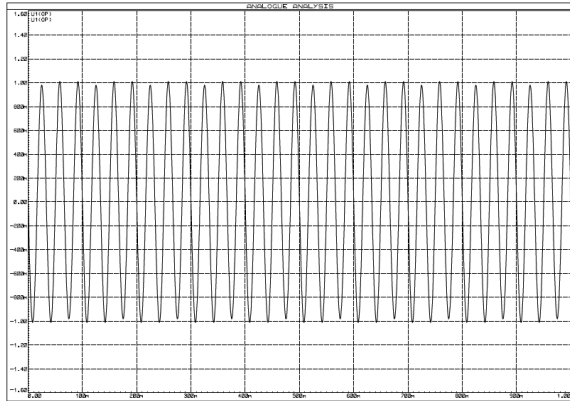
تمامی قطعات آنالوگ بکار رفته ، بایستی دارای یک صفحه زمین مجزا بر روی PCB باشند و این صفحه تنها از طریق یک نقطه به صفحه زمین دیجیتال اتصال داشته باشد.

کوتاه سازی مسیر سیگنال های آنالوگ و دور نگه داشتن آنها از سیگنال های دیجیتال فرکانس بالا، تاثیرات مطلوبی روی دقت مبدل خواهد داشت.

- پایه AVCC میکروکنترلر بایستی از طریق یک شبکه LC پائین گذر به تغذیه دیجیتال وصل شود. این کار تاثیر تغییرات آنی تغذیه را بر روی مبدل ، کاهش می دهد.

- قابلیت ADC Noise Canceler میکروکنترلر های AVR موجب کاهش نویز دریافتی از طریق پردازنده گردیده و اعتبار دقت مبدل آنالوگ به دیجیتال را بالاتر می برد.

- اگر برخی از پین های میکروکنترلر بصورت



شکل ۳: سیگنال پس از عبور از فیلتر دیجیتال و در خروجی مبدل دیجیتال به آنالوگ

#### ۴-۶-۴ - شماتیک و مدارچاپی فیلتر دیجیتال

برای طراحی شماتیک و مدار چاپی فیلتر دیجیتال از نرم افزار Eagle استفاده شده است. شماتیک، طرح Layout و مدارچاپی فیلتر مذکور به ترتیب در شکل های ۴، ۵ و ۶ نمایش داده شده اند. از یک ترمینال ۳ پین ولتاژ تغذیه و نیز سیگنال تک پایانه ای گرفته می شود. برای تثبیت ولتاژ تغذیه (+5volt) جهت مصرف میکروکنترلر، از تنظیم کننده ولتاژ خطی 7805 استفاده شده است. دو خازن 1uF و 100nF جهت فیلتر کردن پرش های ولتاژ ناشی از اعوجاج و ریپل موجود در ولتاژ ورودی، کلید زنی های داخلی میکروکنترلر و همچنین کاهش تداخل الکترومغناطیسی ناشی از میکروکنترلر مورد استفاده قرار گرفته اند. بدلیل حساس بودن مبدل آنالوگ به دیجیتال به پرش های ولتاژ تغذیه، پایه AVCC از طریق یک فیلتر LC پائین گذر (جهت کاهش اثرات ناشی از ریپل ولتاژ تغذیه) به خط تغذیه رگوله شده اتصال یافته است. سیگنال تک پایانه ای ورودی از طریق پایه شماره ۲۰ (PORTA.0) به میکروکنترلر اعمال می شود. سیگنال مرجع مبدل A/D، ولتاژ پایه AVCC در نظر گرفته شده است. جهت دسترسی به خروجی این فیلتر دیجیتال، کافی است ترمینال ۱۰ پین موجود در مدار به یک مبدل دیجیتال به آنالوگ وصل شود.

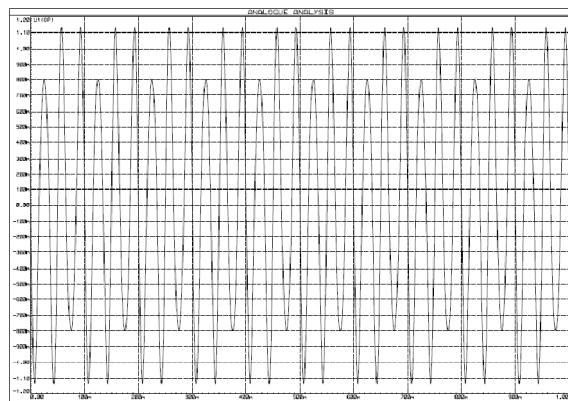
خروجی دیجیتال استفاده می شود، در هنگام عملیات تبدیل آنالوگ به دیجیتال، نایستی عمل کلید زنی روی این پین ها صورت گیرد.

#### ۴-۶-۳ - شبیه سازی توسط نرم افزار

برای شبیه سازی عملکرد فیلتر دیجیتال از دو نرم افزار LabView و Proteus استفاده شده است. فایل های شبیه سازی و کد برنامه اسمبلی نوشته شده برای میکروکنترلر از طریق لینک ذیل قابل دریافت می باشد:

<http://www.faridonline.ir/dig-filter.zip>

سیگنال اصلی یک سینوسی با فرکانس 30Hz (دامنه ۱ ولت) با سیگنال سینوسی مداخله کننده 50Hz (دامنه ۲۰۰ میلی ولت) جمع شده و به عنوان ورودی به پایه ۲۰ میکروکنترلر (PORTA.0) وصل می شود. (شکل ۲) سیگنال ورودی پس از تبدیل به کد دیجیتال و عبور از تابع تبدیل گسسته فیلتر میان نگذر طراحی شده (با توجه به پاسخ فرکانسی فیلتر دیجیتال میان نگذر، خروجی فیلتر در سیگنال 50Hz دارای 30dB تضعیف می باشد) کد دیجیتال خارج شده از فیلتر، به عنوان سیگنال خروجی روی پورت PORTB و دو پین از PORTA قرار می گیرد. با اعمال ۱۰ بیت دیجیتال به یک مبدل دیجیتال به آنالوگ می توان سیگنال فیلتر شده را ساخت. (شکل ۳)



شکل ۲: سیگنال تخریب شده با فرکانس 50Hz

## ۷- نتیجه گیری

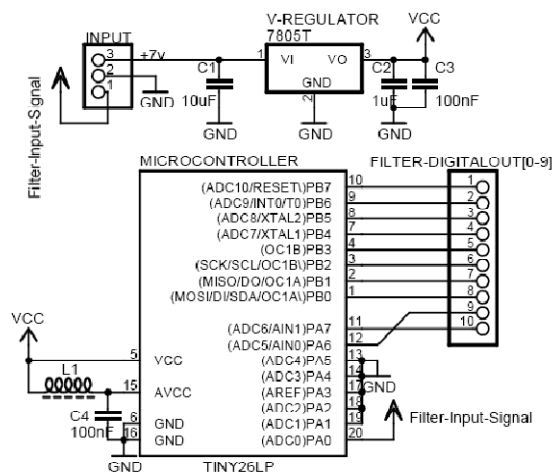
در این مقاله، مبانی فیلترهای دیجیتال و نحوه پیاده سازی آنها بیان گردید و یک نمونه فیلتر دیجیتال میان نگذر عملی با استفاده از یک میکروکنترلر خانواده AVR پیاده سازی شد. با توجه به گسترش روزمره ابزارهای دیجیتالی و ابزارهایی که نیاز به پردازش دیجیتالی سیگنال دارند، لزوم طراحی چنین سیستمهایی بیشتر جلوه نمایی می کند.

## سپاسگزاری

در پایان لازم می دانم از رهنمودهای سازنده جناب آقای دکتر سیامک حقی پور، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تشکر نمایم.

## مراجع

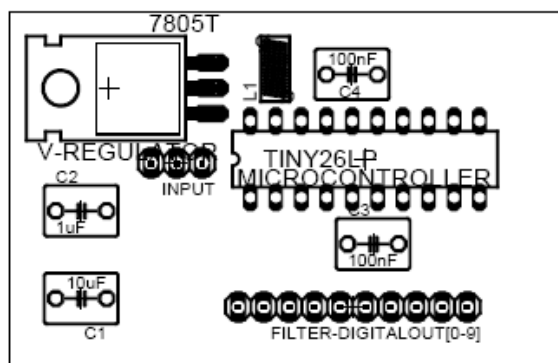
- [1] Proakis, John G. and Manolakis, Dimitris G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, 3rd Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, 1996.
- [2] Analog and digital filter design / Steve Winder.- 2nd ed .
- [3] Ziemer, Rodger E., Tranter, William H., and Fannin, D. Ronald. Signals and Systems: Continuous and Discrete, 3rd Edition. Macmillan Publishing Company, 1993.
- [4] Ellis, Michael G. Electronic Filter Analysis and Synthesis. Norwood, MA: Artech House, 1994.
- [5] Digital Filter Design And Synthesis using High-Level Modeling Tools, Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Brian A. Jackson, 1999
- [6] 8-bit AVR Microcontroller with 2K Bytes Flash , ATTiny26 DataSheet, Rev. 1477C-AVR-09/02



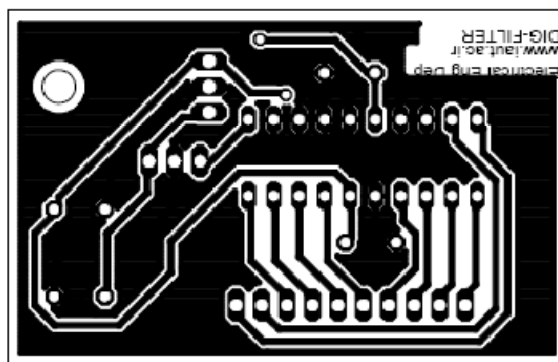
Digital Notch (50Hz) Filter

WWW.IAUT.AC.IR (Electrical Engineering Department)

شکل ۴: شماتیک فیلتر دیجیتال میان نگذر توسط نرم افزار Eagle



شکل ۵: طرح Layout مدار چاپی فیلتر دیجیتال



شکل ۶: طرح پشت فیبر مدار چاپی فیلتر دیجیتال