



دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر

زمان سنج / شمارنده ♦



فهرست مطالب

- زمان سنج / شمارنده صفر به همراه مدولاسیون پهنای باند PWM
- پیش تقسیم کننده زمان سنج / شمارنده ۰ و ۱

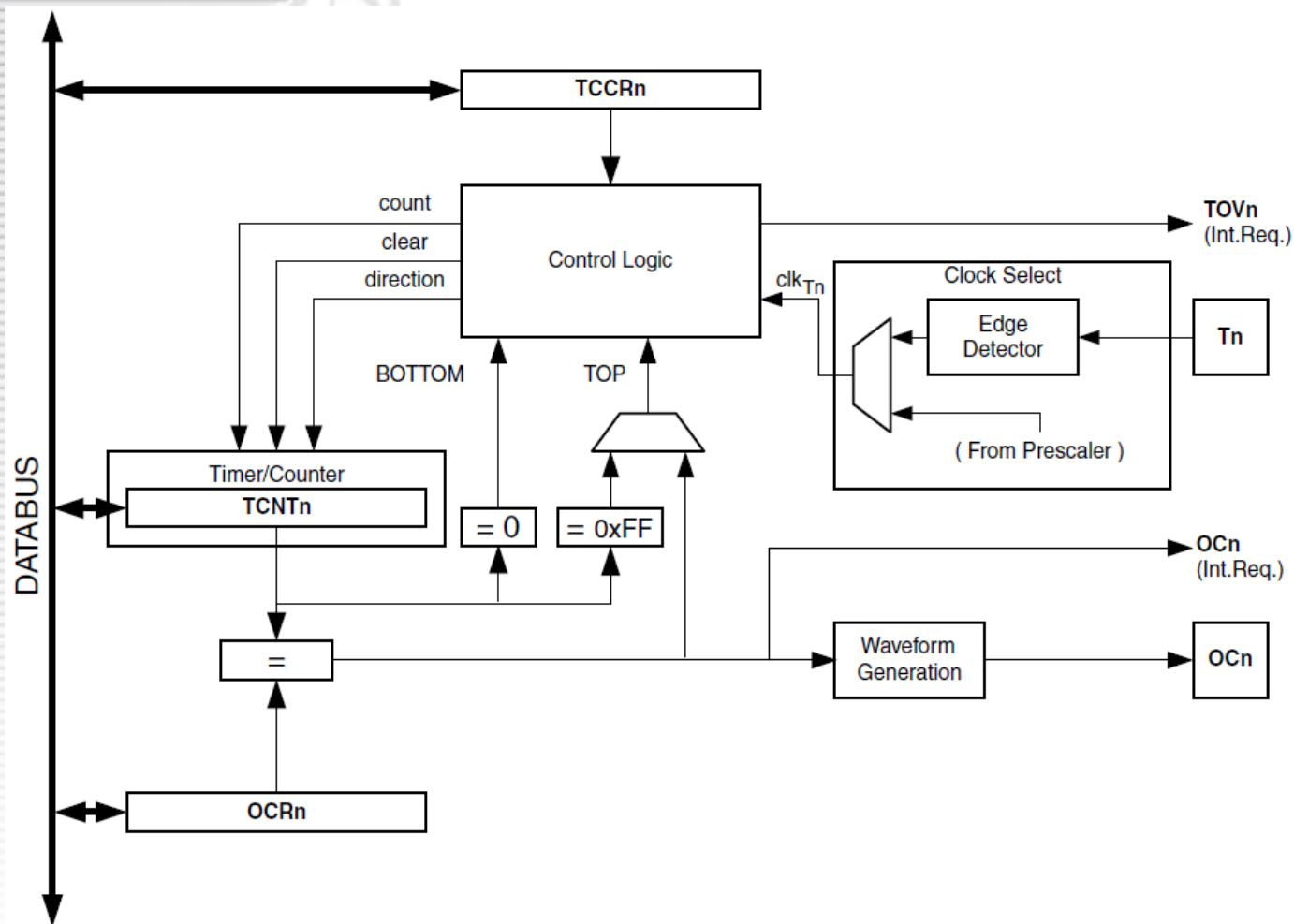
زمان سنج / شمارنده صفر، به همراه مدولاسیون پهنای پالس (PWM)

زمان سنج / شمارنده صفر یک ماژول ۸ بیتی همه منظوره و تک کاناله می باشد. امکانات و ویژگی های اصلی آن عبارتند از:

- یک شمارنده همراه با واحد مقایسه
- پاک کردن زمان سنج پس از برابری مقایسه CTC (قابلیت بارگذاری مجدد)
- مدولاتور پهنای پالس با فاز صحیح (Phase Correct PWM) و بدون خطا و بدون جهش
- مولد فرکانس
- شمارنده رویداد خارجی
- پیش تقسیم کننده ساعت ۱۰ بیتی
- منابع وقفه سرریز و برابری مقایسه (TOV0 و OCF0).

Clear Timer on Compare Match (Auto reload)

نمودار بلوکی زمان سنج / شمارنده ۸ بیتی



ثبات‌ها

- ثبات زمان‌سنج/شمارنده یا TCNT0 و ثبات Output Compare (OCR0)، ثبات‌های ۸ بیتی هستند.
- سیگنال‌های تقاضای وقفه که در شکل با Int.Req. نشان داده شده است، همگی در ثبات پرچم وقفه زمان‌سنج (TIFR)، قابل مشاهده هستند.
- تک‌تک وقفه‌ها با استفاده از ثبات پوشش وقفه زمان‌سنج (TIMSK)، قابل پوشش و غیرفعال شدن هستند.
- از آنجایی که ثبات‌های TIFR و TIMSK توسط واحدهای دیگر زمان‌سنج به اشتراک گذاشته شده است، این دو ثبات در شکل نشان داده نشده‌اند.

ثبات‌ها

- زمان‌سنج/شمارنده، می‌تواند بصورت داخلی، توسط پیش‌تقسیم‌کننده و یا از طریق پایه T0 بصورت خارجی پالس ساعت دریافت نماید.
- مدار منطقی انتخاب ساعت (clock select)، منبع پالس ساعت و لبه‌ای را که زمان‌سنج/شمارنده برای افزایش (یا کاهش) مقدار خودش استفاده می‌کند را کنترل می‌نماید.
- زمانی که هیچ منبع پالس ساعتی انتخاب نشود، زمان‌سنج/شمارنده غیر فعال می‌شود. خروجی منطق انتخاب ساعت را ساعت زمان‌سنج می‌نامیم (clk_{T0}).

ثبات‌ها

- مقدار ثبات Output Compare با بافر دابل (OCR0) همواره با مقدار ثبات TCNT0 زمان‌سنج/شمارنده مقایسه می‌شود.

- حاصل مقایسه می‌تواند توسط مولد شکل موج برای ایجاد یک موج مدولاسیون پهنای پالس (PWM) و یا یک خروجی با فرکانس متغیر، بر روی پایه output compare یعنی پایه OC0، مورد استفاده قرار گیرد.

- علاوه بر این، رویداد برابری مقایسه پرچم مقایسه (OCF0) را یک خواهد کرد که آن هم می‌تواند به نوبه خود برای تولید یک درخواست وقفه Output Compare مورد استفاده قرار گیرد.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0	TIFR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

تعاریف

شمارنده زمانی به BOTTOM می‌رسد که مقدار آن 0x00 شود.

BOTTOM

شمارنده زمانی به MAX می‌رسد که مقدار آن 255 (یا 0xFF) شود.

MAX

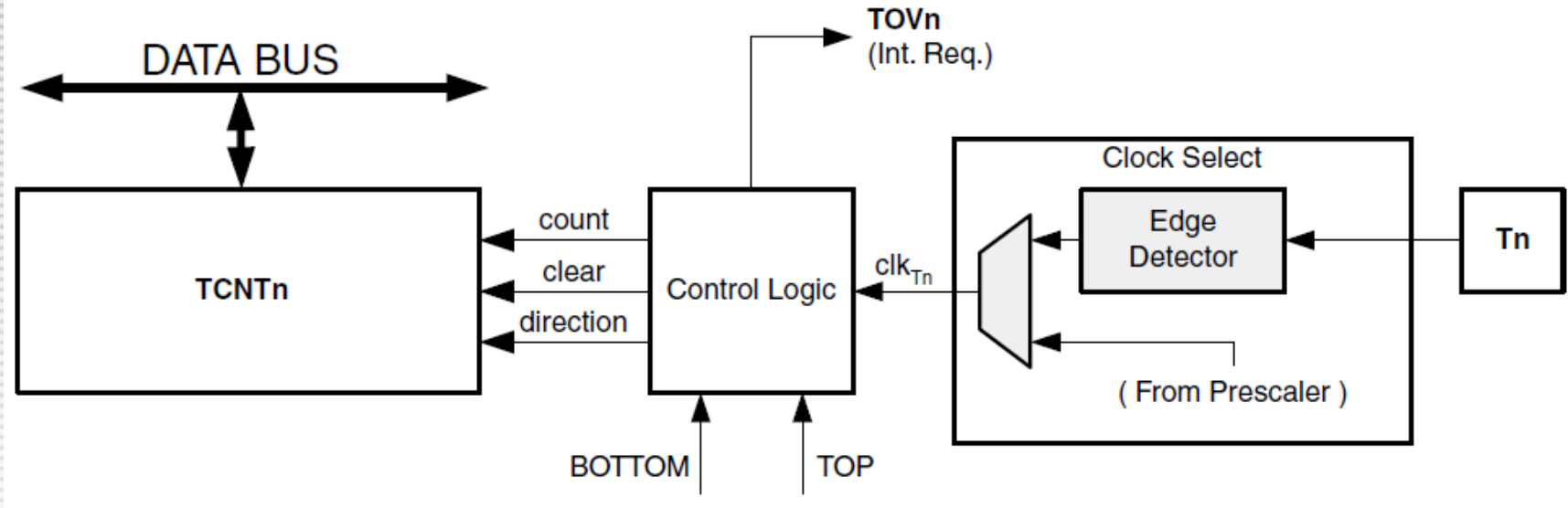
شمارنده زمانی به TOP می‌رسد که مقدار آن به بیشترین مقدار در دنباله شمارش برسد. مقدار TOP می‌تواند مقدار ثابت 255 (MAX) و یا مقدار ذخیره شده در ثبات OCRO باشد. مقدار انتساب یافته به حالت عملکرد بستگی دارد.

TOP

منابع ساعت زمان سنج / شمارنده

- زمان سنج / شمارنده می تواند از داخل میکروکنترلر یا از بیرون آن پالس ساعت دریافت نماید.
- منبع ساعت توسط واحد انتخاب ساعت که توسط بیت های انتخاب ساعت (**CS02:0**) در ثبات کنترلی زمان سنج / شمارنده (**TCCR0**) کنترل می شود، قابل انتخاب است.

واحد شمارنده



اصلی ترین بخش زمان سنج/شمارنده ۸ بیتی، واحد شمارنده دوجهته قابل برنامه ریزی آن می باشد.

واحد شمارنده

توضیح سیگنال‌ها به شرح زیر است:

- **Count**: کاهش یا افزایش تک واحدی TCNT0 به میزان یک واحد
- **Direction**: تعیین کننده جهت شمارش (صعودی یا نزولی)
- **Clear**: پاک کردن TCNT0 (صفر کردن تمام بیت‌ها)
- **Clk_{T0}**: ساعت زمان سنج/شمارنده
- **TOP**: معلوم می‌کند که TCNT0 به مقدار بیشینه خود رسیده است.
- **BOTTOM**: معلوم می‌کند که TCNT0 به مقدار کمینه خود (یعنی صفر) رسیده است.

واحد شمارنده

- بسته به حالت عملیاتی مورد استفاده، شمارنده با هر پالس ساعت زمان سنج (clk_{T0})، پاک شده، افزایش، و یا کاهش می یابد.
- clk_{T0} می تواند توسط یک منبع ساعت داخلی و یا خارجی تولید شود. این موضوع را بیت های انتخاب ساعت (CS02:0) تعیین می کنند.
- زمانی که هیچ منبع ساعتی انتخاب نشود ($CS02:0=0$)، زمان سنج متوقف می شود.
- صرف نظر از وجود یا عدم وجود clk_{T0} ، مقدار TCNT0 توسط CPU قابل دستیابی است. یک عمل نوشتن توسط CPU می تواند تمام عملیات های پاک کردن و یا شمارش را ملغی نماید، چرا که CPU اولویتش بیشتر است.

واحد شمارنده

- دنباله شمارش توسط بیت‌های **WGM00** و **WGM01**، که در ثبات کنترلی **TCCR0** قرار دارند، تنظیم می‌شود.
- ارتباط نزدیکی بین رفتار (نحوه شمارش) شمارنده و نحوه تولید شکل موج‌ها بر روی خروجی مقایسه‌ی خروجی **OC0**، وجود دارد.
- برای جزئیات بیشتر در مورد دنباله‌های شمارش پیشرفته و تولید شکل موج‌ها، به بخش "مُد‌های عملیاتی" مراجعه کنید.
- پرچم سرریز زمان‌سنج/شمارنده (**TOV0**) بر اساس حالت عملیاتی که توسط بیت‌های **WGM01:0** انتخاب می‌گردد، یک می‌شود. سیگنال **TOV0** می‌تواند برای تولید یک وقفه **CPU** مورد استفاده قرار گیرد.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0	TIFR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

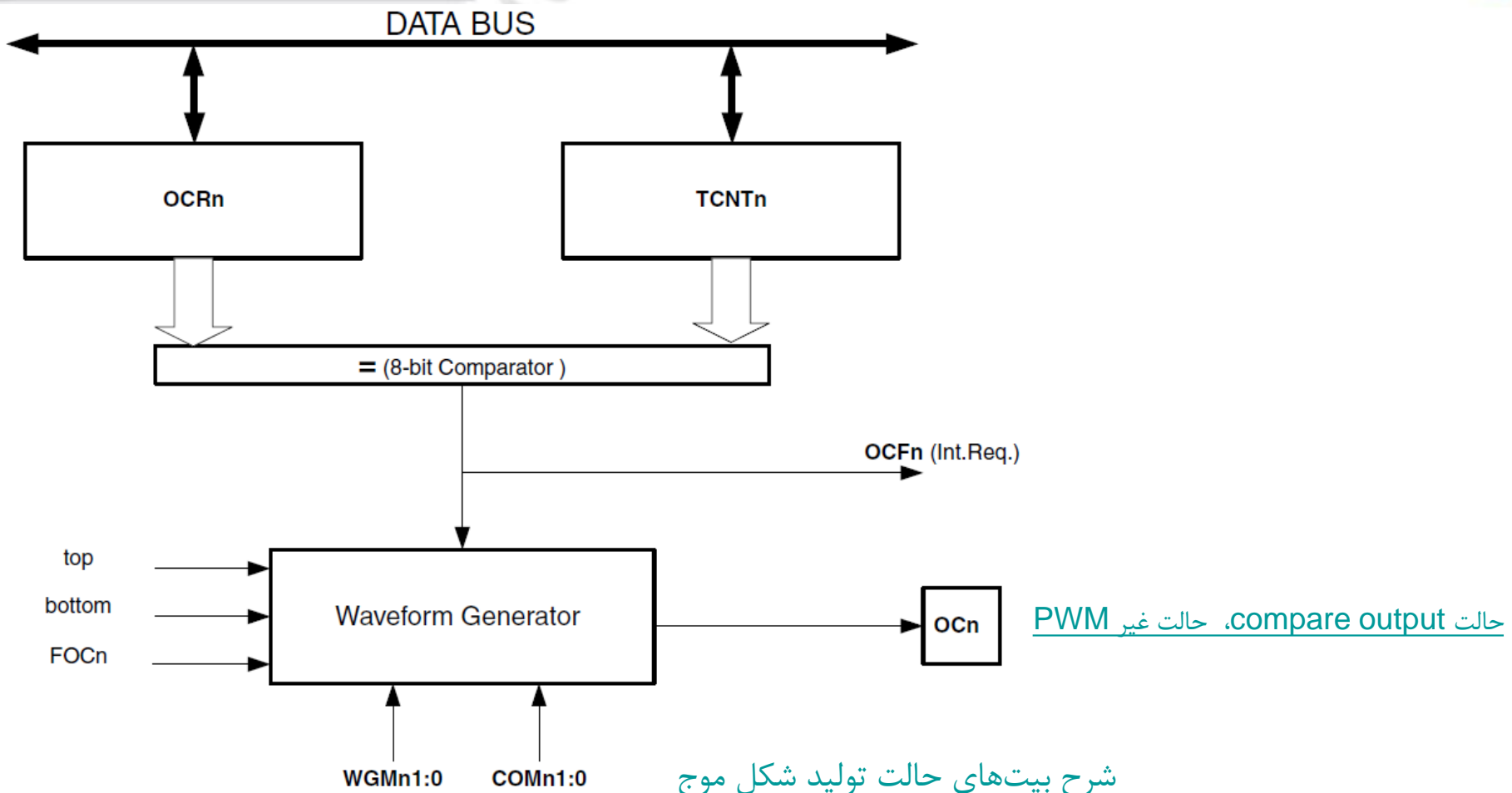
واحد Output Compare

- مقایسه‌گر ۸ بیتی بطور مداوم مقدار ثبات Output Compare یعنی ثبات (OCR0) را با TCNT0 مقایسه می‌کند؛
- هر زمان که TCNT0 با OCR0 برابر شد، مقایسه‌گر یک تطبیق را گزارش می‌دهد
- این تطبیق می‌تواند در چرخه ساعت زمان‌سنج بعدی، پرچم Output Compare را یک کند.
- در صورتی که اجازه داده شود (بیت OCIE0 و بیت وقفه سراسری I در SREG یک باشند)، پرچم Output Compare یک وقفه Output Compare تولید می‌کند.

واحد Output Compare

- پرچم OCF0 بطور خودکار، هنگامی که وقفه اجرا شود، صفر می‌شود؛ یا اینکه می‌توان آنرا با نوشتن یک منطقی در محل بیت I/O مربوط به آن، صفر کرد.
- مولد شکل موج از سیگنال تطبیق (match signal)، برای تولید یک خروجی بر اساس حالت عملیاتی، که توسط بیت‌های WGM01:0 و بیت‌های مود Compare Output یعنی بیت‌های (COM01:0) تنظیم می‌شود، استفاده می‌کند.
- سیگنال‌های MAX و BOTTOM هم در برخی از حالت‌های عملیاتی، توسط مولد سیگنال، برای مدیریت برخی از حالات خاص از مقادیر حدی، مورد استفاده قرار می‌گیرند (به بخش "مُد‌های عملیاتی" مراجعه کنید).

نمودار بلوکی واحد Output Compare



واحد Output Compare

- اگر از هر یک از حالت‌های PWM استفاده شود، ثبات OCR0 بصورت دوبل بافر خواهد شد.
- برای حالت عادی و حالت پاک کردن زمان‌سنج پس از برابری مقایسه (CTC)، امکان بافر نمودن دوبل، غیر فعال می‌شود.
- بافر نمودن دوبل، موجب می‌شود که بروزرسانی ثبات OCR0 در حد بالا یا پایین دنباله شمارش (یعنی مقادیر TOP و BOTTOM) انجام شود. همگام‌سازی از وقوع پالس‌های PWM نامتقارن جلوگیری می‌کند، در نتیجه خروجی بدون جهش‌های ناخواسته خواهد شد.
- در صورتی که وضعیت بافرنمودن بصورت دوبل فعال باشد، CPU به ثبات بافر OCR0 دسترسی دارد، و در صورتی هم که بافرنمودن بصورت دوبل غیرفعال باشد، CPU مستقیماً به OCR0 دسترسی خواهد داشت.

Output Compare اجباری

- در حالت‌های تولید شکل‌موج غیر PWM، خروجی معادل برابری مقایسه را می‌توان با نوشتن مقدار یک در بیت FOC0 به اجبار تولید کرد.
- اینکار پرچم OCF0 را یک نمی‌کند و یا باعث پاک‌شدن یا بارگذاری مجدد زمان‌سنج نمی‌شود. اما پایه OC0 شبیه زمانی که یک برابری مقایسه واقعی رخ داده باشد به روز می‌شود.
- بیت‌های COM01:0 بیان می‌کنند که آیا پایه OC0 یک یا صفر شده و یا تغییر حالت دهد.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0	TIFR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	FOC0	WGM00	COM01	COM00	WGM01	CS02	CS01	CS00	TCCR0
Read/Write	W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

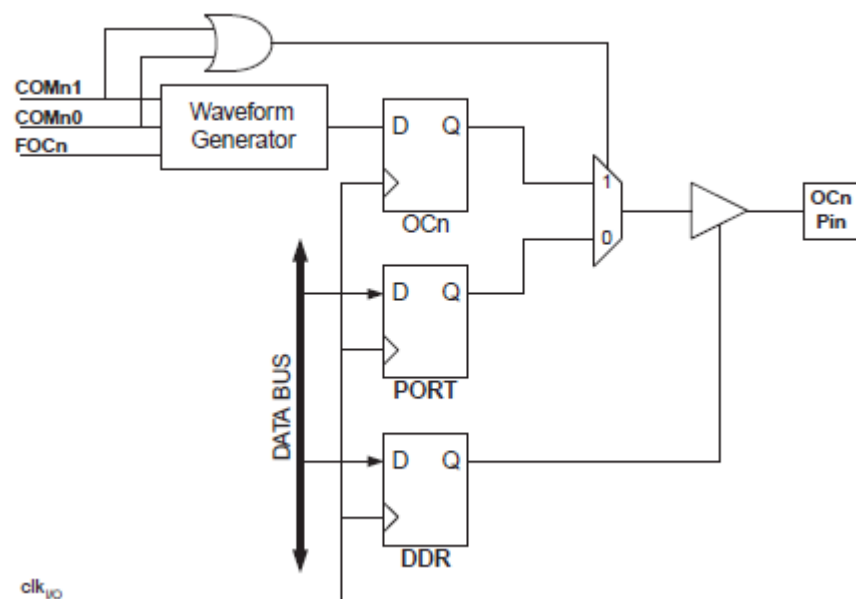
جلوگیری از برابری مقایسه به وسیله نوشتن در TCNT0

- تمامی عملیات‌های نوشتن CPU در TCNT0، حتی زمانی که زمان‌سنج متوقف است، از هرگونه برابری مقایسه در چرخه ساعت بعدی زمان‌سنج جلوگیری می‌کند.

شمای واحد خروجی برابری مقایسه

حالت Compare Output، حالت PWM سریع

بیت FOC0



هنگام مراجعه به وضعیت OC0، مراجعه به ثبات (پرچم) داخلی OC0 صورت می‌گیرد و نه به پایه OC0. در صورتی که میکروکنترلر بازنشانی شود، ثبات OC0 با صفر مقداردهی می‌شود.

حالت Output Compare و تولید شکل موج

- مولد شکل موج از بیت‌های COM01:0 در حالت‌های عادی، CTC و PWM به صورت‌های متفاوتی استفاده می‌نماید.
- برای تمامی حالت‌ها، تنظیم COM1:0=0، به مولد شکل موج اعلام می‌دارد که هیچ عملی روی ثبات OC0 در برابری مقایسه بعدی انجام نشود.
- در خصوص عملیات‌های Output Compare در حالت‌های غیر PWM، برای PWM سریع و برای PWM با فاز صحیح در ادامه صحبت خواهد شد.
- Clear Timer on Compare (CTC)

حالت‌های عملیاتی

- مد عملیاتی یا به عبارت دیگر رفتار زمان‌سنج/شمارنده و پایه‌های Output Compare، توسط ترکیب بیت‌های حالت تولید شکل موج (WGM01:0) و حالت Compare Output (COM01:0) تعیین می‌شود.
- بیت‌های COM01:0 کنترل می‌کنند که خروجی تولید شده توسط PWM باید معکوس شود یا نه (برای تولید موج PWM معکوس یا نامعکوس). برای حالت‌های غیر PWM بیت‌های COM01:0 کنترل می‌کنند که در یک برابری مقایسه، خروجی باید یک یا صفر شده و یا تغییر حالت دهد.
- شرح بیت‌های حالت تولید شکل موج

حالت عملکرد عادی

- ساده‌ترین حالت عملیاتی برای کارکرد زمان‌سنج، حالت نرمال ($WGM01:0 = 0$) است. در این حالت جهت شمارش همیشه به صورت صعودی بوده و پاک کردن شمارنده انجام نمی‌شود.
- شمارنده زمانی که به مقدار بیشینه ۸ بیتی خود ($TOP = 0xFF$) برسد، سرریز می‌شود و بعد دوباره شمارش را از مقدار $BOTTOM$ ($BOTTOM = 0x00$) شروع می‌کند.
- در حالت عملکرد عادی پرچم سرریز مربوط به زمان‌سنج/شمارنده ($TOV0$) در همان چرخه ساعتی یک می‌شود که $TCNT0$ صفر شده است.

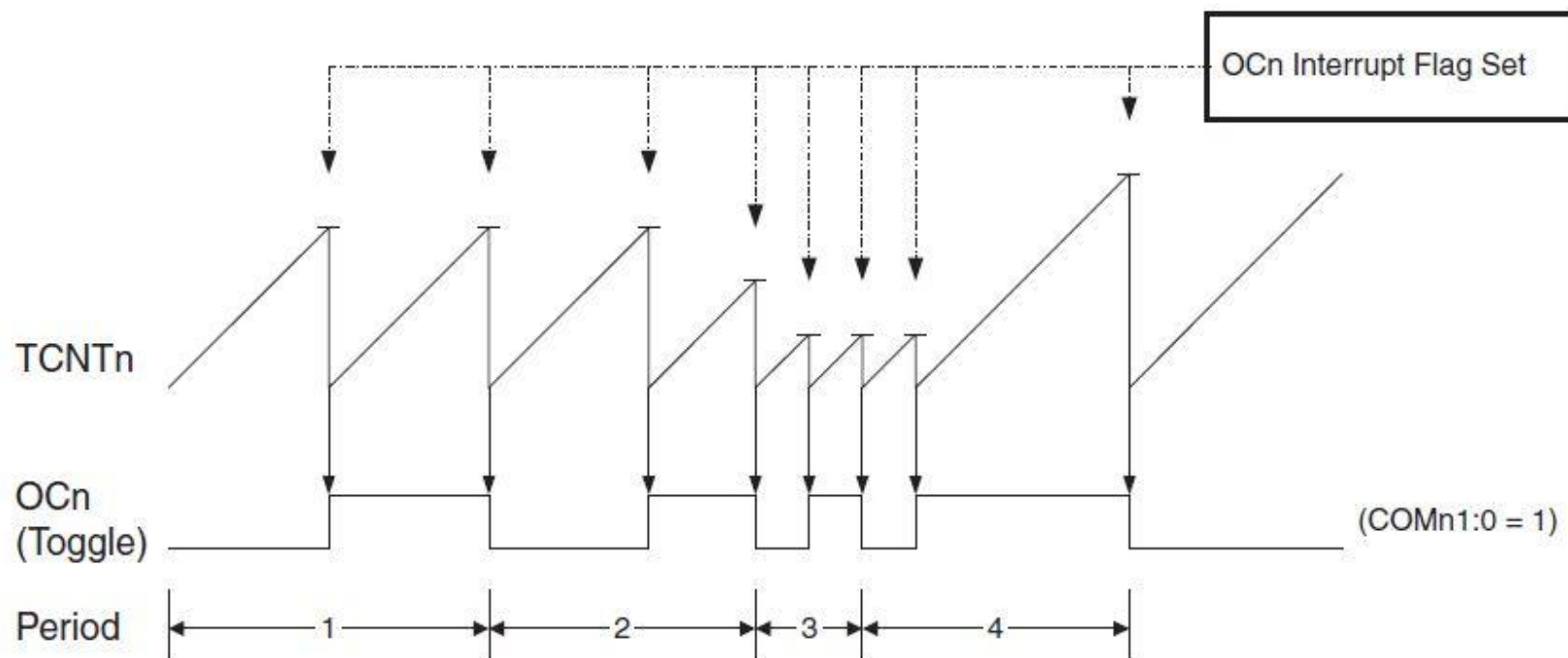
حالت عملکرد عادی

- در این حالت پرچم TOV0 مانند یک بیت نهم رفتار می‌کند، به جز اینکه قابلیت صفر شدن ندارد و فقط می‌توان آن را یک کرد.
- به هر حال، در ترکیب با وقفه سرریز مربوط به زمان سنج که به طور خودکار پرچم TOV0 را صفر می‌کند، دقت زمان سنج می‌تواند به طور نرم‌افزاری افزایش یابد.
- در حالت عادی در هر زمانی می‌توان یک مقدار جدید در شمارنده نوشت.

حالت پاک کردن زمان سنج پس از برابری مقایسه (CTC)

- در این حالت که از این به بعد آنرا حالت CTC می‌نامیم ($WGM01:0 = 0$)، ثبات OCR0 برای اداره کردن میزان دقت شمارنده به کار می‌رود.
- در حالت CTC زمانیکه مقدار شمارنده TCNT0 با مقدار OCR0 یکی شود، شمارنده صفر می‌شود.
- OCR0 مقدار بالا برای شمارنده و همین طور میزان دقت آن را مشخص می‌کند. این مد، کنترل بهتری بر روی فرکانس خروجی برابری مقایسه فراهم می‌کند و همچنین عملکرد شمارش رویدادهای خارجی را تسهیل می‌کند.

شمای زمان بندی مد CTC



مقدار شمارنده TCNT0 تا زمانی که یک برابری مقایسه بین OCR0 و TCNT0 روی دهد، افزایش می یابد و بعد از آن شمارنده TCNT0 صفر می شود.

حالت compare output، حالت غیر PWM

حالت CTC

- با استفاده از پرچم **OCF0** در هر بار که مقدار شمارنده به مقدار بالا (Top) می‌رسد، امکان ایجاد یک وقفه وجود دارد.
- اگر وقفه فعال باشد، می‌توان از برنامه کنترل وقفه برای به روز کردن مقدار TOP استفاده کرد.

حالت CTC

- با این حال در زمانی که شمارنده با مقدار پایین پیش تقسیم کننده یا بدون آن در حال کار است، تغییر مقدار TOP به مقداری نزدیک به مقدار BOTTOM، باید با احتیاط انجام شود.
- این نکته بدان دلیل است که حالت CTC دارای قابلیت بافر دوگانه نیست.
- اگر مقدار جدید نوشته شده در OCR0 کمتر از مقدار جاری TCNT0 باشد، شمارنده، موقعیت برابری مقایسه را از دست می دهد. سپس شمارنده مجبور به شمارش تا مقدار بیشینه خود (0xFF) می شود و قبل از اینکه امکان بروز برابری مقایسه فراهم شود دوباره شمارش را از 0x00 شروع می کند.

حالت CTC

- برای تولید یک خروجی شکل موج در حالت CTC، با تنظیم بیت‌های حالت Compare Output به حالت تغییر حالت (COM01:0)، می‌توان خروجی OC0 را به گونه‌ای تنظیم کرد که با هر برابری مقایسه تغییر حالت دهد.
- تا زمانی که جهت داده برای پایه درگاه در حالت خروجی تنظیم نشده باشد، مقدار OC0 در پایه درگاه قابل رویت نخواهد بود.
- شکل موج تولید شده زمانی که OCR0 با 0x00 مقداردهی شده باشد، دارای بیشینه فرکانس با مقدار $f_{OC0} = f_{clk_IO}/2$ خواهد بود.

حالت compare output، حالت غیر PWM

COM01	COM00	Description
0	0	Normal port operation, OC0 disconnected.
0	1	Toggle OC0 on compare match
1	0	Clear OC0 on compare match
1	1	Set OC0 on compare match

حالت CTC

- فرکانس شکل موج با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است. در این رابطه متغیر N بیانگر ضریب پیش تقسیم کننده است و می تواند مقادیر 1، 8، 64، 256، 1024 داشته باشد.

$$f_{OCn} = \frac{f_{clk_I/O}}{2 \cdot N \cdot (1 + OCRn)}$$

- مشابه حالت عادی، پرچم TOV0 در همان چرخه ساعت زمان سنج یک می شود که شمارنده از مقدار بیشینه MAX به مقدار 0x00 شمارش می کند.

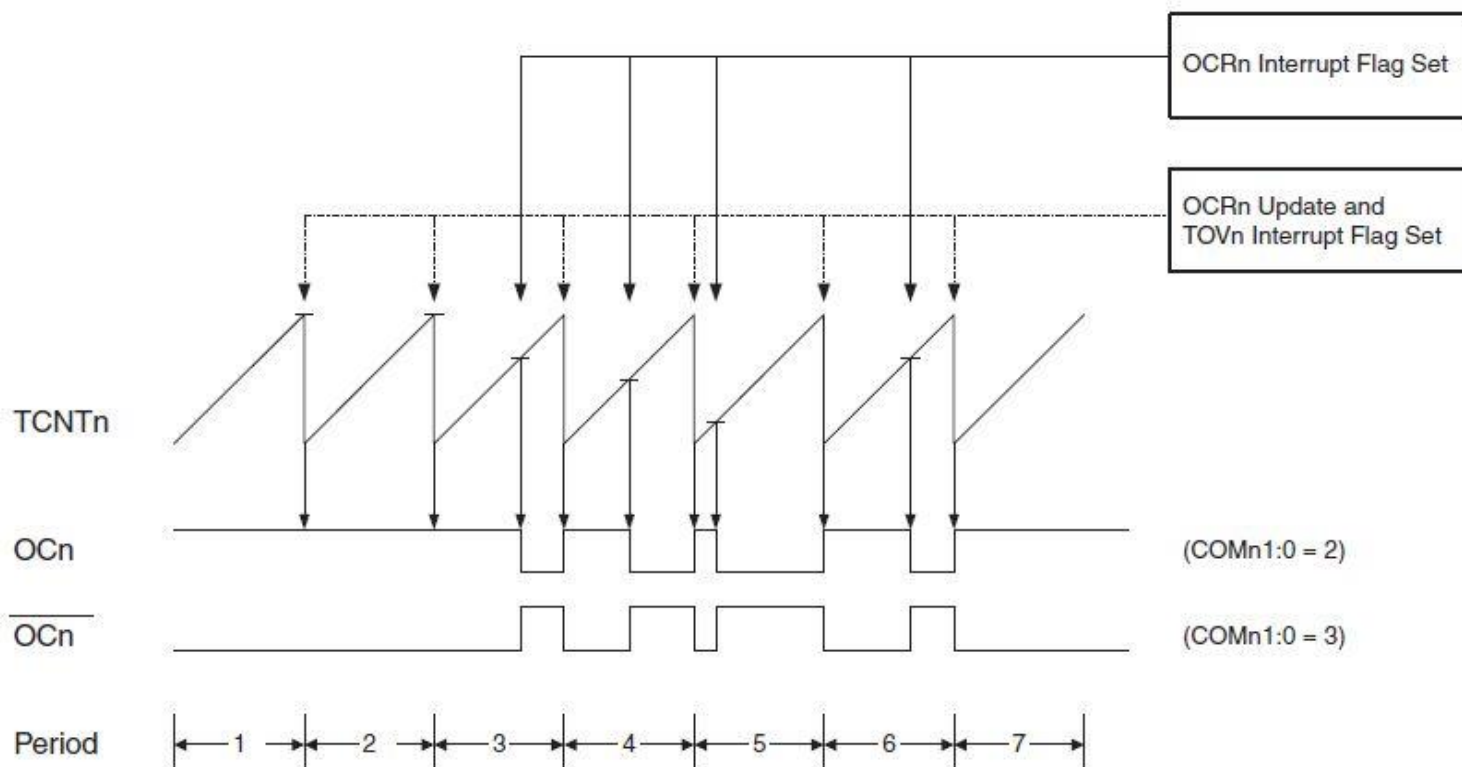
مد PWM سریع

- مد PWM سریع یا مدولاسیون پهنای پالس سریع ($WGM01:0=3$) امکان تولید شکل موج PWM با فرکانس بالا را فراهم می‌سازد.
- حالت PWM سریع به دلیل استفاده از عملیات تک-شیب با سایر انواع PWM متفاوت است.
- شمارنده از مقدار BOTTOM تا مقدار بیشینه MAX شمارش می‌کند و سپس دوباره از مقدار BOTTOM شروع می‌کند.
- در حالت Compare Output (OC0) نامعکوس، بین TCNT0 و OCR0 صفر می‌شود و در BOTTOM مقدار یک می‌گیرد.

مد PWM سریع

- در حالت Compare Output معکوس، خروجی در اثر برابری مقایسه یک شده و در مقدار BOTTOM صفر می شود.
- به دلیل عملیات تک شیب، فرکانس عملیاتی حالت PWM سریع می تواند تا دو برابر از حالت PWM با فاز صحیح که از عملیات دارای شیب دو گانه استفاده می کند، بیشتر باشد.
- فرکانس عملیاتی بالا باعث می شود که حالت PWM سریع برای تنظیم ولتاژ و توان، یکسوسازی و کاربردهای تبدیل آنالوگ به دیجیتال (ADC) مناسب باشد.
- فرکانس بالا استفاده از قطعاتی که از نظر فیزیکی دارای ابعاد کوچک تری هستند (مانند پیچها و خازن ها) را میسر می سازد. بنا براین هزینه کل سیستم نیز کاهش می یابد.

نمودار زمانبندی حالت PWM سریع



در حالت PWM سریع، شمارنده تا زمانی که مقدار آن به مقدار MAX برسد افزایش می‌یابد، سپس در چرخه ساعت بعدی شمارنده صفر می‌شود. هر دو نوع خروجی‌های PWM معکوس و نامعکوس‌کننده در این نمودار مشاهده می‌شوند. خطوط افقی کوچک روی شیب‌های $TCNT0$ ، نمایانگر رخدادهای برابری مقایسه بین $OCR0$ و $TCNT0$ می‌باشند.

مد PWM سریع

- پرچم سرریز مربوط به زمان سنج/شمارنده (پرچم TOV0) در هر بار که شمارنده به مقدار MAX می‌رسد، یک می‌شود.
- اگر سیستم وقفه فعال باشد، برنامه مدیریت وقفه می‌تواند برای به روز کردن مقادیر مقایسه استفاده شود.
- در حالت PWM سریع واحد مقایسه امکان تولید شکل موج PWM را روی پایه OC0 فراهم می‌سازد.
- تنظیم بیت‌های COM01:0 به مقدار ۲، یک PWM نامعکوس تولید می‌کند و با تنظیم بیت‌های COM01:0 روی مقدار ۳، یک PWM معکوس به دست می‌آید.

حالت Compare Output، حالت PWM سریع

COM01	COM00	Description
0	0	Normal port operation, OC0 disconnected.
0	1	Reserved
1	0	Clear OC0 on compare match, set OC0 at BOTTOM, (non-inverting mode)
1	1	Set OC0 on compare match, clear OC0 at BOTTOM, (inverting mode)

مطابق با جدول زیر عمل می‌شود، ولی یک کردن و صفر کردن هر

شمای واحد خروجی برابری مقایسه

مد PWM سریع

- اگر جهت داده برای پایه درگاه در وضعیت خروجی تنظیم شده باشد مقدار واقعی OC0 روی پایه درگاه قابل مشاهده خواهد بود.
- شکل موج PWM با یک (یا صفر) کردن ثبات OC0 در برابری مقایسه بین OCR0 و TCNT0 و صفر (یا یک) کردن ثبات OC0 در آن سیکل ساعت زمان سنج که شمارنده پاک می شود (از مقدار TOP به مقدار BOTTOM تغییر می کند) تولید می شود.

مد PWM سریع

- فرکانس PWM برای خروجی از رابطه زیر قابل محاسبه است. در این رابطه متغیر N بیانگر ضریب پیش تقسیم کننده است و می تواند مقادیر ۱، ۸، ۶۴، ۲۵۶، ۱۰۲۴ داشته باشد.

$$f_{OCnPWM} = \frac{f_{clk_I/O}}{N \cdot 256}$$

- در مواقع تولید خروجی یک شکل موج PWM در حالت کاری PWM سریع، مقادیر حدی برای ثبات OCR0 بیانگر موارد خاصی هستند.
- اگر OCR0 برابر با مقدار BOTTOM مقدار بگیرد، خروجی برای هر Max+1 چرخه ساعت، به صورت یک پالس سوزنی ظاهر می شود.
- مقداردهی OCR0 با مقدار MAX، باعث ایجاد یک خروجی دائمی با سطح منطقی بالا یا پایین می شود (بسته به قطبیت خروجی که توسط بیت های COM01:0 تعیین می شود).

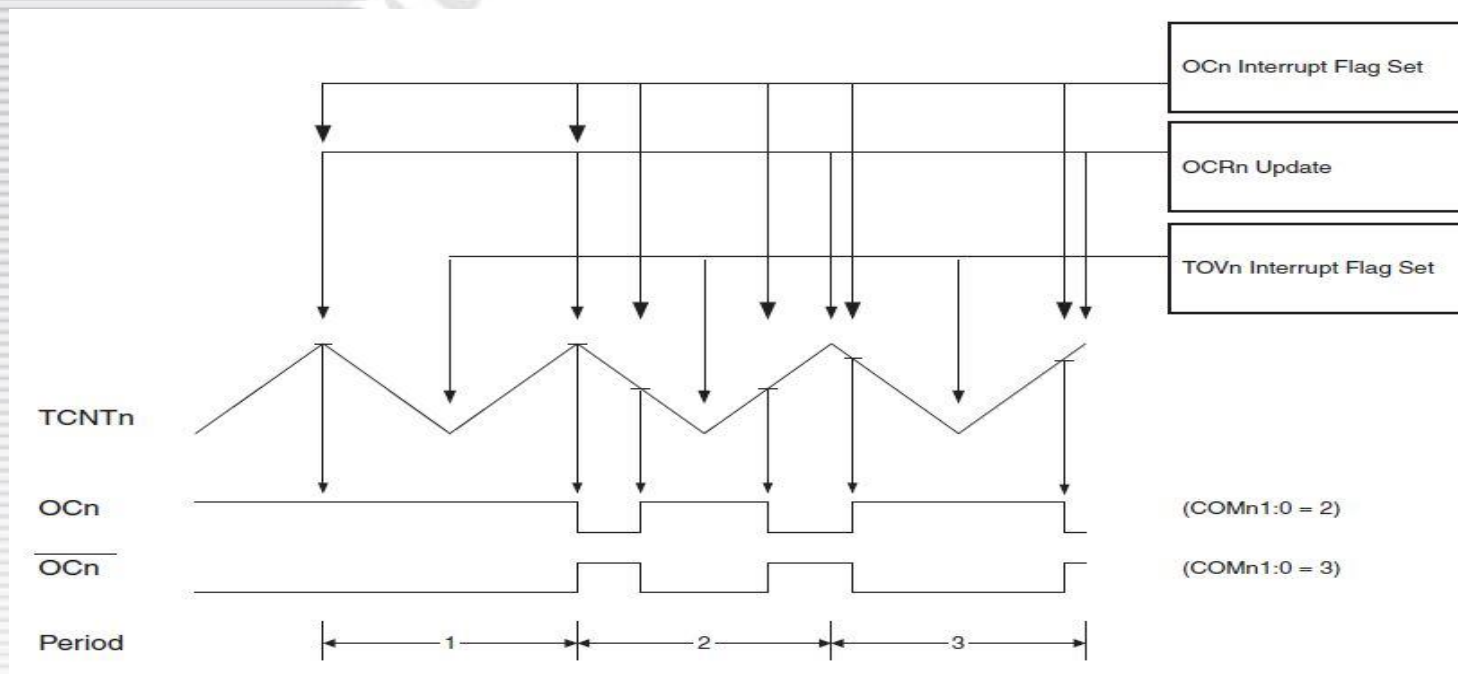
مد PWM با فاز صحیح

- مد PWM با فاز صحیح، ($WGM01:0 = 1$) قابلیت تولید شکل موج PWM با فاز صحیح با میزان دقت بالا را امکان پذیر می‌سازد.
- حالت PWM با فاز صحیح بر پایه عملیات دارای شیب دوگانه بنا نهاده شده است.
- شمارنده مرتبا از مقدار BOTTOM تا مقدار MAX و سپس از مقدار MAX تا مقدار BOTTOM شمارش می‌کند.
- در حالت "Compare Output نامعکوس"، پایه Output Compare (OC0) در حالیکه شمارنده در حال شمارش صعودی است و یک برابری مقایسه بین TCNT0 و OCR0 روی دهد، صفر می‌شود و زمانی که شمارش نزولی است و برابری مقایسه روی می‌دهد، یک می‌شود.

مد PWM با فاز صحیح

- در حالت "Output Compare معکوس"، عملیات معکوس می‌شود.
- عملیات دارای شیبِ دوگانه، فرکانس عملیاتی کمتری نسبت به بیشینه فرکانس عملیاتی تک-شیب است.
- با این حال به خاطر ویژگی توازن حالت‌های PWM با شیب دوگانه، این حالت‌ها برای کاربردهای "کنترل موتور" ارجحیت دارند.
- دقت PWM برای حالت PWM با فاز صحیح دارای مقدار ثابت ۸ بیت است.
- در حالت PWM با فاز صحیح، تا زمانی که شمارنده به مقدار MAX برسد، مقدار شمارنده افزایش می‌یابد. زمانی که شمارنده به مقدار MAX برسد، جهت شمارش عوض می‌شود. مقدار TCNT0 برای یک چرخه ساعت زمان‌سنج برابر مقدار MAX می‌شود.

نمودار زمان بندی PWM با فاز صحیح



نمودار شامل خروجی های PWM معکوس و نامعکوس می شود. خطوط افقی کوچک روی شیب های TCNT0 بیانگر رخداد های برابری مقایسه بین OCR0 و TCNT0 هستند.

مد PWM با فاز صحیح

- پرچم سرریز زمان سنج/شمارنده (TOV0) هر بار که شمارنده به مقدار **BOTTOM** می‌رسد **یک** می‌شود. هر بار که شمارنده به مقدار **BOTTOM** می‌رسد می‌توان از پرچم وقفه برای تولید یک وقفه استفاده کرد.
- در حالت PWM با فاز صحیح، واحد مقایسه تولید شکل امواج PWM را روی پایه OC0 مقدر می‌سازد.
- تنظیم بیت‌های COM01:0 به مقدار **۲**، یک PWM **نامعکوس** را نتیجه می‌دهد. یک خروجی PWM **معکوس** با مقداردهی بیت‌های COM01:0 به مقدار **۳** قابل تولید است.

مد PWM با فاز صحیح

- مقدار واقعی OC0 تنها زمانی روی پایه درگاه قابل رویت است که جهت داده برای پایه درگاه در وضعیت خروجی تنظیم شده باشد.
- شکل موج PWM با صفر کردن (یا یک کردن) OC0 در یک برابری مقایسه بین OCR0 و TCNT0 در حات صعودی شمارنده و نیز هنگام یک کردن (یا صفر کردن) ثبات OC0 در حالت برابری مقایسه بین OCR0 و TCNT0 در حالت شمارش نزولی شمارنده تولید می شود.

مد PWM با فاز صحیح

- فرکانس PWM برای خروجی زمانی که از حالت PWM با فاز صحیح استفاده می‌شود، از رابطه زیر قابل محاسبه است. در این رابطه متغیر N بیانگر ضریب پیش تقسیم کننده است (1, 8, 64, 256, 1024).

$$f_{OCnPCPWM} = \frac{f_{clk_I/O}}{N \cdot 510}$$

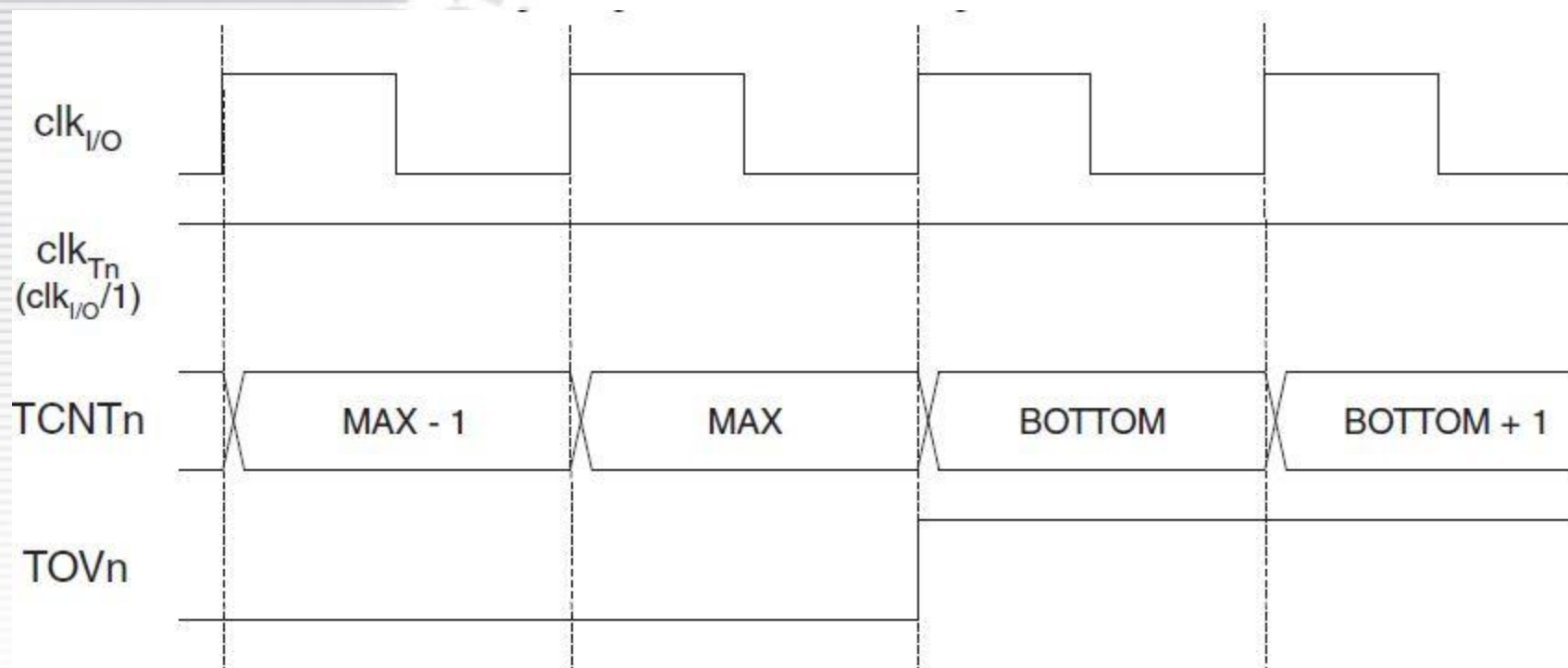
- هنگام تولید خروجی شکل موج PWM در حالت PWM با فاز صحیح مقادیر حدی برای ثبات OCR0 بیانگر موارد خاص هستند.
- در حالت PWM نامعکوس اگر OCR0 برابر BOTTOM مقداردهی شود، خروجی به طور پیوسته دارای سطح منطقی پایین خواهد بود و اگر برابر مقدار MAX مقداردهی شود، خروجی به طور دائم دارای سطح منطقی بالا خواهد بود. در حالت PWM معکوس، خروجی دارای مقادیر منطقی معکوس خواهد بود.

نمودارهای زمان بندی زمان سنج / شمارنده

- شکل های اسلایدهای بعد، زمان سنج/شمارنده را در حالت همگام نشان می دهند و بنابراین ساعت زمان سنج (clk_{T0}) در شکل های بعدی به عنوان سیگنال فعال ساز ساعت نشان داده شده است.
- در حالت نا همگام، $clk_{I/O}$ باید با ساعت نوسان ساز زمان سنج/شمارنده جایگزین شود. شکل هایی که در ادامه خواهد آمد، دارای اطلاعات در مورد زمان و چگونگی یک شدن پرچم های وقفه است.

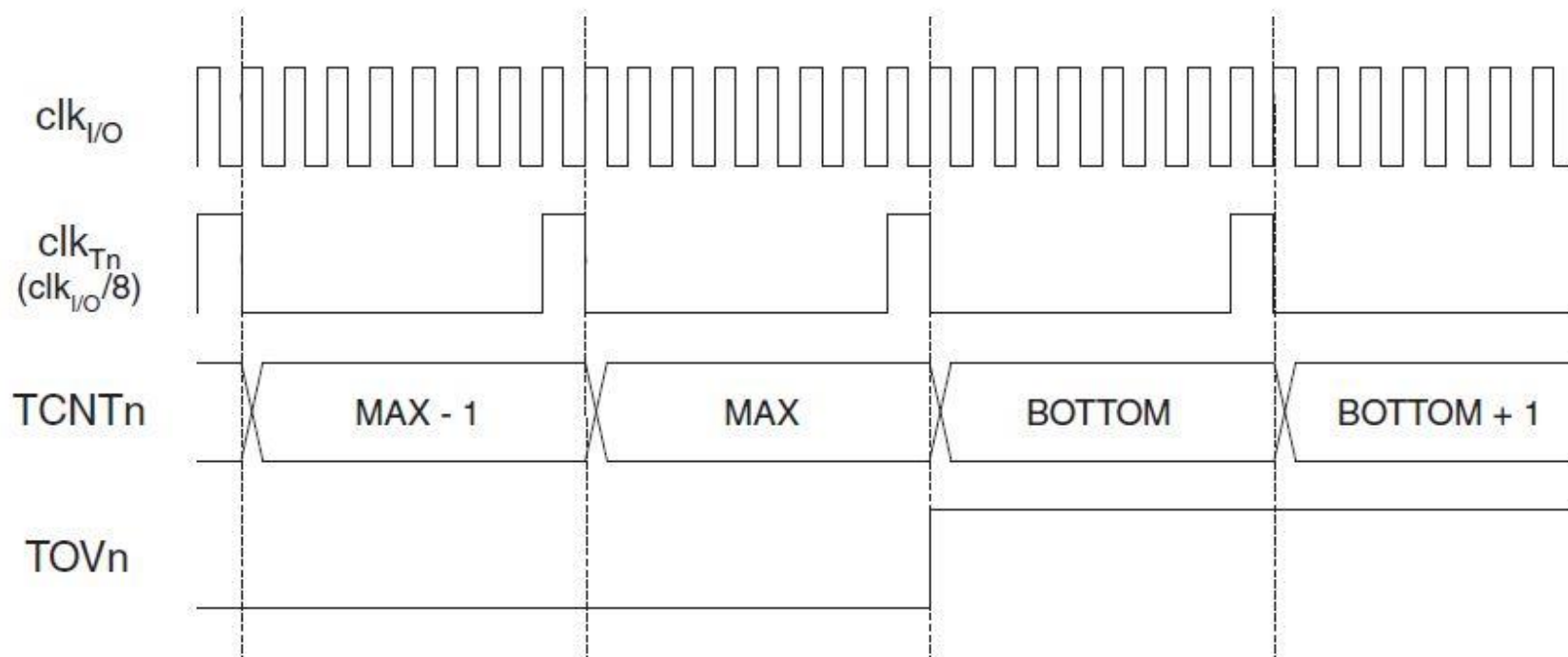
نمودار زمان بندی زمان سنج / شمارنده، بدون پیش تقسیم کننده

این شکل توالی شمارش در نزدیکی مقدار MAX در تمام حالت ها غیر از حالت PWM با فاز صحیح را نشان می دهد.

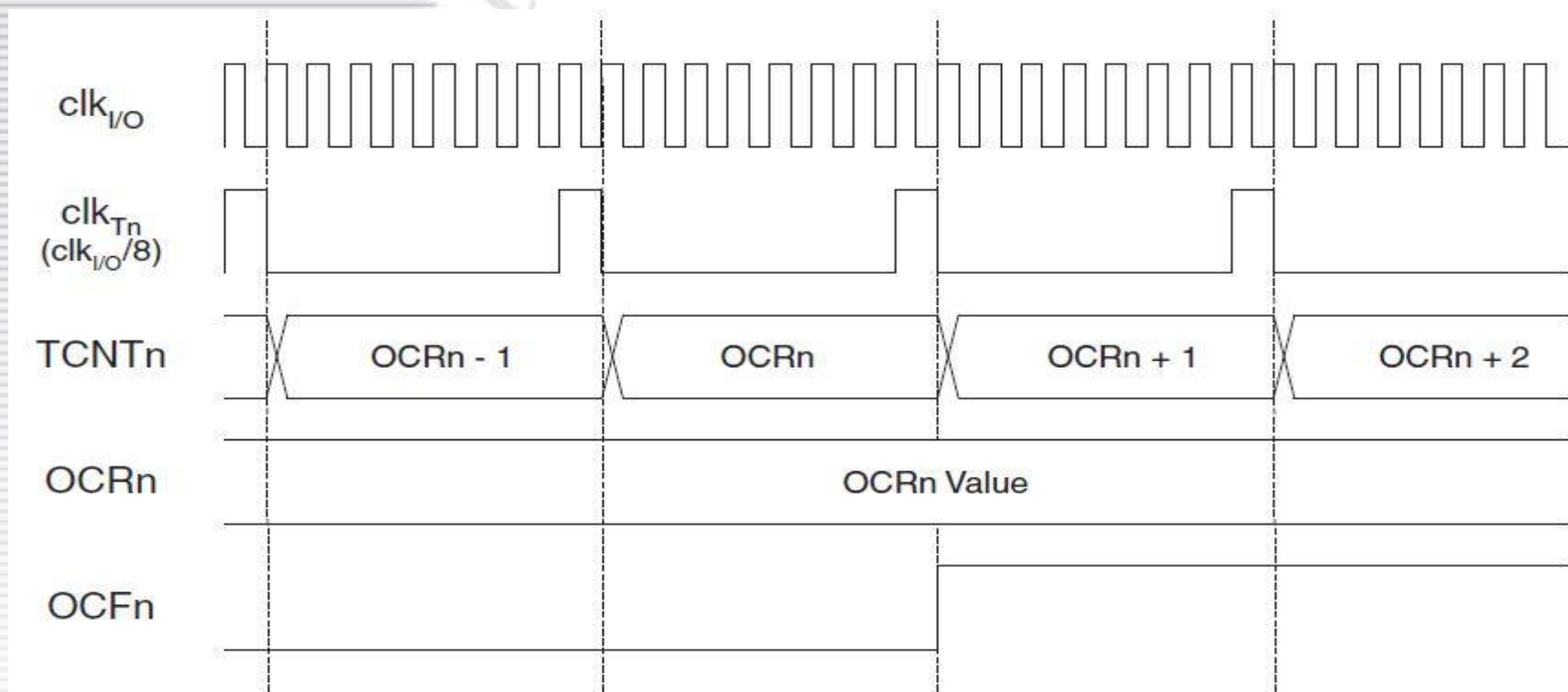


نمودار زمان بندی زمان سنج/شمارنده، با پیش تقسیم کننده فعال ($f_{clk_IO}/8$).

این شکل توالی شمارش در نزدیکی مقدار MAX در تمام حالت ها غیر از حالت PWM با فاز صحیح را با حضور پیش تقسیم کننده نشان می دهد.

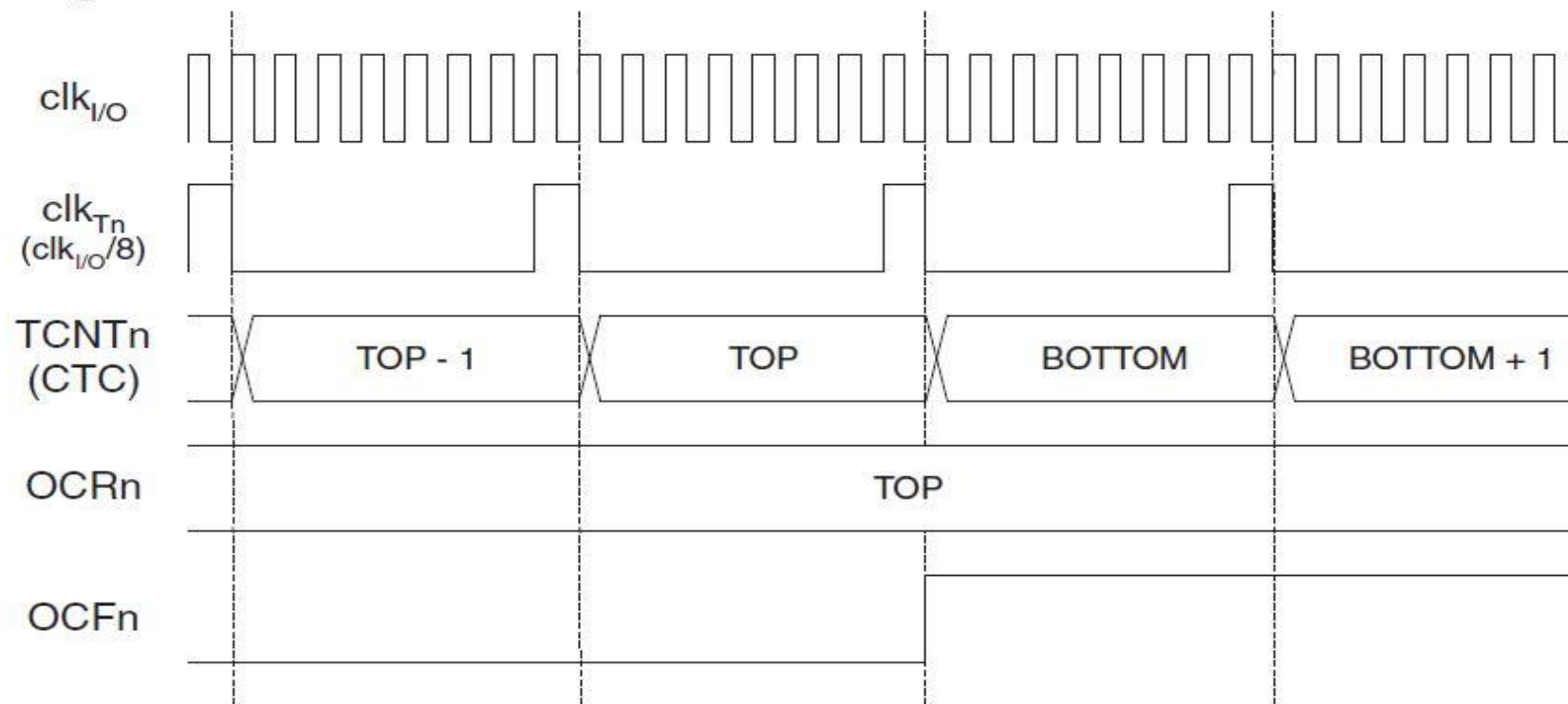


نمودار زمان بندی زمان سنج/شمارنده، یک شدن OCF0، پیش تقسیم کننده فعال ($f_{clk_IO}/8$)



شکل فوق چگونگی یک کردن OCF0 در همه حالت‌ها غیر از حالت CTC را نشان می‌دهد.

نمودار زمان بندی زمان سنج / شمارنده، پاک کردن زمان سنج در حالت برابری مقایسه، پیش تقسیم کننده فعال ($f_{clk_IO}/8$).



چگونگی یک کردن OCF0 و صفر کردن TCNT0 در حالت CTC را نشان می دهد.

تشریح ثبات‌های زمان‌سنج/شمارنده ۸ بیتی

- ثبات کنترل زمان‌سنج/شمارنده (**TCCR0**):

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	FOC0	WGM00	COM01	COM00	WGM01	CS02	CS01	CS00	TCCR0
Read/Write	W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

تشریح ثبات‌های زمان سنج/شمارنده ۸ بیتی

بیت ۷ – FOC0: بیت Force Output Compare

- زمانی که مقدار یک در بیت FOC0 نوشته می‌شود، بلافاصله یک برابری مقایسه اجباری بر روی واحد تولید شکل موج تحمیل می‌شود.
- بیت FOC0 تنها زمانی فعال می‌شود که بیت‌های WGM بیانگر یک حالت غیر PWM باشند.

تشریح ثبات‌های زمان‌سنج/شمارنده ۸ بیتی

بیت ۷ – FOC0 : بیت Force Output Compare (ادامه):

- خروجی OC0 با توجه به چگونگی تنظیمات بیت‌های COM01:0 تغییر می‌کند.
- توجه شود که بیت FOC0 به عنوان یک راه‌انداز (استروب) پیاده‌سازی می‌شود. لذا در حقیقت این مقدار موجود در بیت‌های COM01:0 است که تاثیر مقایسه تحمیل شده را تعیین می‌کند.
- یک استروب FOC0، نه هیچ گونه وقفه‌ای تولید می‌کند و نه زمان‌سنج را در حالی که در حالت CTC است و از مقدار موجود در OCR0 به عنوان مقدار TOP استفاده می‌کند، را پاک می‌نماید.
- بیت FOC0 در صورت خوانده شدن همیشه مقدارش صفر خواهد بود.
- بازگشت به شمای واحد خروجی برابری مقایسه

تشریح ثبات‌های زمان‌سنج/شمارنده ۸ بیتی

بیت‌های ۳ و ۶ – WGM01:0: حالت تولید شکل موج

- این بیت‌ها نوع عملکرد زمان‌سنج/شمارنده را تعیین می‌کنند.
- یعنی اینکه توالی شمارش شمارنده، منبع برای مقدار ماگزیمم (TOP) شمارنده و نوع تولید شکل‌موجی که قرار است مورد استفاده قرار گیرد را کنترل می‌کنند.
- حالت‌های عملیاتی که توسط واحد زمان‌سنج/شمارنده پشتیبانی می‌شوند عبارتند از:
حالت عادی، حالت CTC و دو نوع از حالت‌های PWM

شرح بیت‌های حالت تولید شکل موج

Mode	WGM01 (CTC0)	WGM00 (PWM0)	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCR0	TOV0 Flag Set-on
0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	1	PWM, Phase Correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	1	0	CTC	OCR0	Immediate	MAX
3	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX

نمودار بلوکی واحد Output Compare

حالت‌های عملیاتی

شرح بیت‌های حالت تولید شکل موج

- بیت‌های ۴ الی ۵ - COM01:0 : حالت خروجی برابری مقایسه
این بیت‌ها رفتار پایه Output Compare (OC0) را کنترل می‌کنند.

اگر یک یا هر دو بیت COM01:0 مقداردهی شوند، خروجی OC0 عملکرد عادی پایه I/O که OC0 به آن متصل است را ملغی می‌کند. با این حال، توجه کنید که بیت ثبات جهت داده (Data Direction Register - DDR) متناظر با پایه OC0 باید یک شود تا درایور خروجی فعال شود.

زمانی که OC0 به پایه متصل است، کارکرد بیت‌های COM01:0 به چگونگی مقداردهی بیت‌های WGM01:0 بستگی دارد.

جدول زیر چگونگی کارکرد بیت COM01:0 زمانی که بیت‌های WGM01:0 در حالت عادی یا CTC (غیر از PWM) تنظیم شده‌اند را نشان می‌دهد.

حالت compare output، حالت غیر PWM

بازگشت به بلوکی واحد Output Compare
بازگشت

COM01	COM00	Description
0	0	Normal port operation, OC0 disconnected.
0	1	Toggle OC0 on compare match
1	0	Clear OC0 on compare match
1	1	Set OC0 on compare match

حالت Compare Output، حالت PWM سریع

COM01	COM00	Description
0	0	Normal port operation, OC0 disconnected.
0	1	Reserved
1	0	Clear OC0 on compare match, set OC0 at BOTTOM, (non-inverting mode)
1	1	Set OC0 on compare match, clear OC0 at BOTTOM, (inverting mode)

مطابق با جدول زیر عمل می‌شود، ولی یک کردن و صفر کردن هر

شمای واحد خروجی برابری مقایسه

حالت compare output، حالت غیر PWM

بازگشت به بلوکی واحد Output Compare بازگشت

COM01	COM00	Description
0	0	Normal port operation, OC0 disconnected.
0	1	Toggle OC0 on compare match
1	0	Clear OC0 on compare match
1	1	Set OC0 on compare match

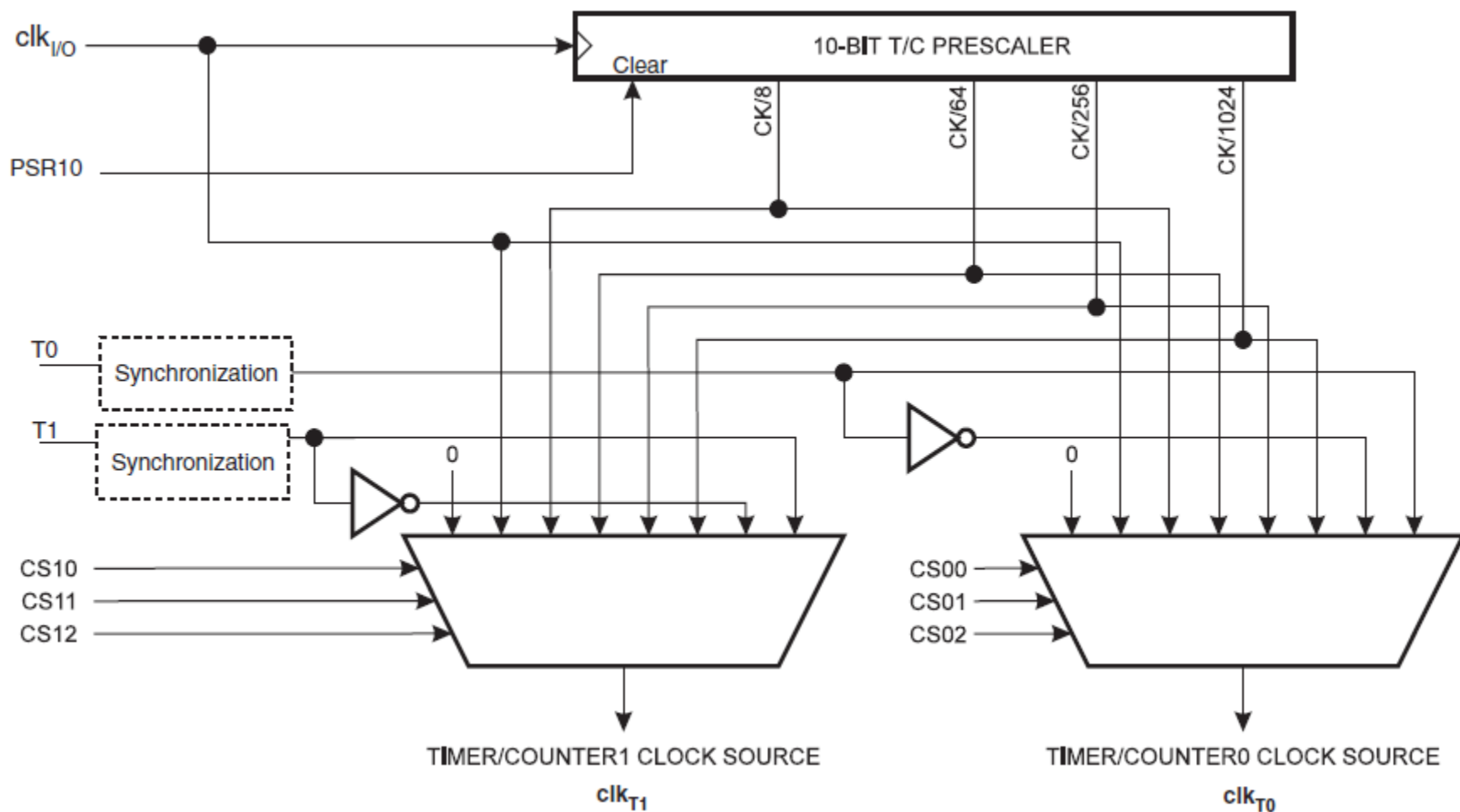
حالت Compare Output، حالت PWM با فاز صحیح

COM01	COM00	Description
0	0	Normal port operation, OC0 disconnected.
0	1	Reserved
1	0	Clear OC0 on compare match when up-counting. Set OC0 on compare match when downcounting.
1	1	Set OC0 on compare match when up-counting. Clear OC0 on compare match when downcounting.

پیش تقسیم کننده زمان سنج / شمارنده ۰ و ۱

- زمان سنج / شمارنده ۰ و زمان سنج / شمارنده ۱، پیش تقسیم کننده یکسانی را مشترکاً استفاده می کنند، اما زمان سنج / شمارنده ها می توانند تنظیمات پیش تقسیم کننده مختلفی داشته باشند.
- توصیفاتی که در ادامه ارائه می شود هردو زمان سنج / شمارنده را در بر می گیرد.

پیش تقسیم کننده برای زمان سنج / شمارنده شماره ۰ و ۱



انتخاب خروجی پیش تقسیم کننده توسط زمان سنج / شمارنده

- ثبات کنترل زمان سنج / شمارنده (TCCR0):

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	FOC0	WGM00	COM01	COM00	WGM01	CS02	CS01	CS00	TCCR0
Read/Write	W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

- بیت های ۰ الی ۲ - CS02:0 : انتخاب ساعت

- سه بیت انتخاب منبع ساعت که توسط زمان سنج / شمارنده استفاده می شوند را در جدول مشاهده می کنید.

CS02	CS01	CS00	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	$clk_{I/O}$ / (No prescaling)
0	1	0	$clk_{I/O}$ / 8 (From prescaler)
0	1	1	$clk_{I/O}$ / 64 (From prescaler)
1	0	0	$clk_{I/O}$ / 256 (From prescaler)
1	0	1	$clk_{I/O}$ / 1024 (From prescaler)
1	1	0	External clock source on T0 pin. Clock on falling edge.
1	1	1	External clock source on T0 pin. Clock on rising edge.

منبع ساعت داخلی

- ساعت زنی زمان سنج/شمارنده می تواند مستقیما توسط **ساعت سیستم** (با قرار دادن $CSn2:0=1$)، انجام شود.
- این حالت **سریع ترین حالت عملیاتی** را با بیشینه فرکانس زمان سنج/شمارنده و مساوی با فرکانس ساعت سیستم ($f_{CLK_I/O}$) فراهم می سازد.
- به طریق دیگر، یکی از چهار انشعاب پیش تقسیم کننده می تواند به عنوان یک منبع ساعت استفاده شود.
- ساعتی که پیش مقیاس بر آن اعمال شده یکی از فرکانس های $f_{clk_IO/64}$ ، $f_{clk_IO/8}$ ، $f_{clk_IO/1024}$ و $f_{clk_IO/256}$ را داراست.

انتخاب خروجی پیش تقسیم کننده توسط زمان سنج/شمارنده

- پیش تقسیم کننده مستقل از واحد انتخاب ساعت زمان سنج/شمارنده عمل می کند و بین زمان سنج/شمارنده های ۰ و ۱ به اشتراک گذاشته شده است.
- هنگامی که یک زمان سنج/شمارنده ای فعال باشد و توسط پیش تقسیم کننده پالس ساعت دریافت کند ($1 < CSn2:0 < 6$)، تعداد سیکل های ساعت سیستم، از زمانی که زمان سنج فعال می شود تا زمان رخداد اولین شمارش، می تواند از ۱ تا $N+1$ سیکل ساعت سیستم بطول می انجامد.
- N در اینجا مساوی تقسیمات پیش تقسیم کننده است و می تواند یکی از مقادیر ۸، ۶۴، ۲۵۶ و ۱۰۲۴ را داشته باشد.

بازنشانی پیش تقسیم کننده

- می توان با بازنشانی پیش تقسیم کننده، برای همگام کردن زمان سنج/شمارنده با اجرای برنامه استفاده نمود.
- اما باید دقت نمود که زمان سنج/شمارنده دیگر نیز از همین پیش تقسیم کننده استفاده می نماید.
- یک بازنشانی پیش تقسیم کننده، پریود پیش تقسیم کننده را برای تمامی زمان سنج/شمارنده هایی که بدان متصل هستند متاثر می نماید.

بازنشانی پیش تقسیم کننده

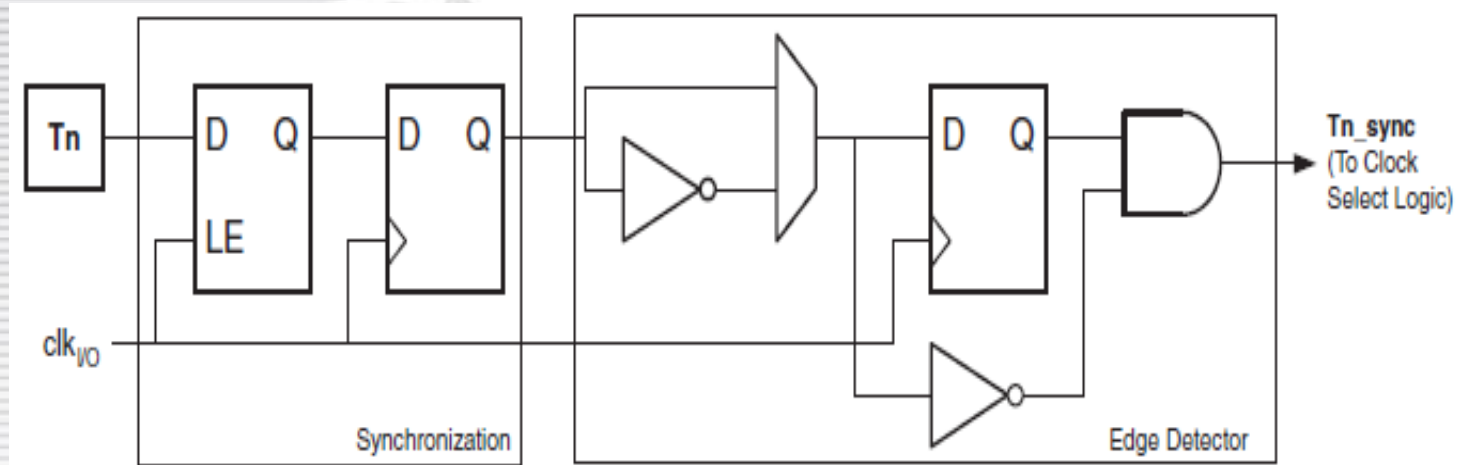
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADTS2	ADTS1	ADTS0	–	ACME	PUD	PSR2	PSR10	SFIOR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

- **بیت ۰-PSR10:** بازنشانی پیش تقسیم کننده زمان سنج/شمارنده ۰ و ۱:
 • زمانی که این بیت با مقدار **یک** نوشته می شود، پیش تقسیم کننده زمان سنج/شمارنده های ۰ و ۱ **بازنشانی** خواهد شد.
- بعد از انجام عملیات، بیت به صورت سخت افزاری صفر می شود. نوشتن صفر در این بیت هیچ تاثیری نخواهد داشت.
- توجه داشته باشید که زمان سنج/شمارنده های ۰ و ۱ هر دو پیش تقسیم کننده یکسانی را به اشتراک استفاده می کنند و بازنشانی این پیش تقسیم کننده هر دو زمان سنج را متاثر می کند. این بیت همیشه با مقدار صفر خوانده می شود.

منبع ساعت خارجی

- یک منبع ساعت خارجی متصل به پایه $T1/T0$ می‌تواند به عنوان ساعت (Clk_{T1}/Clk_{T0}) استفاده شود.
- پایه $T1/T0$ ، در هر سیکل ساعت یکبار توسط واحد همگام‌سازی پایه نمونه‌برداری می‌شود. سیگنال همگام‌شده (نمونه‌برداری شده) سپس از آشکارساز لبه عبور می‌کند.
- ثبات‌ها در لبه مثبت ساعت سیستم $(clk_{I/O})$ ، پالس ساعت دریافت می‌کنند. تشخیص دهنده لبه، یک پالس Clk_{T1}/Clk_{T0} برای هر لبه مثبت $(CSn2:0=7)$ یا منفی $(CSn2:0=6)$ که آشکار می‌سازد تولید می‌کند.

نمونه برداری از پایه های T1/T0



منبع ساعت خارجی

- واحد آشکارسازی لبه و همگام‌سازی یک تاخیر در حدود ۲.۵ تا ۳.۵ سیکل ساعت سیستم بین لحظه اعمال یک لبه به پایه $T1/T0$ تا زمان به روز شدن شمارنده ایجاد می‌کند.
- هر نیم پریود از ساعت خارجی اعمال شده باید از سیکل ساعت سیستم بلندتر باشد تا نمونه‌برداری صحیح را تضمین نماید. باید تضمین شود که فرکانس ساعت خارجی، در حالیکه سیکل وظیفه ۵۰٪ است، کمتر از نصف فرکانس ساعت سیستم باشد
$$(f_{ExtClk} < f_{clk-I/O}/2)$$

منبع ساعت خارجی

- از آنجا که تشخیص دهنده لبه از نمونه برداری استفاده می نماید، حداکثر فرکانس یک ساعت خارجی که می تواند آشکار کند نصف فرکانس نمونه برداری خواهد بود (قضیه نمونه برداری نایکوئیست).

- اما به دلیل تغییرات فرکانس ساعت سیستم و تغییرات سیکل وظیفه که از انحرافات منبع نوسان ساز (کریستال، تشدیدکننده و خازن ها) ناشی می شود، توصیه می گردد که فرکانس بیشینه یک منبع ساعت خارجی کمتر از $f_{clk-I/O}/2.5$ باشد. پیش تقسیم بر روی یک منبع ساعت خارجی قابل انجام نیست.

ثبات زمان سنج / شمارنده – TCNT0

- ثبات زمان سنج / شمارنده دسترسی مستقیم برای هر دو عملیات خواندن و نوشتن به واحد شمارنده ۸ بیتی زمان سنج / شمارنده را فراهم می‌سازد. نوشتن در ثبات TCNT0 مانع از برابری مقایسه در ساعت زمان سنج بعدی می‌شود.
- اصلاح شمارنده (TCNT0) در زمانی که شمارنده در حال کار است، موجب ریسک از دست دادن یک برابری مقایسه بین TCNT0 و ثبات OCR0 می‌شود.

ثبات زمان سنج / شمارنده – TCNT0

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	TCNT0[7:0]								TCNT0
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

ثبات TCNT0

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCR0[7:0]								OCR0
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

ثبات OCR0 – Output Compare

- ثبات Output Compare شامل یک مقدار ۸ بیتی است که به طور مداوم با مقدار شمارنده TCNT0 مقایسه می‌شود.
- یک تطابق می‌تواند برای تولید یک وقفه Output Compare یا برای تولید یک خروجی شکل موج روی پایه OC0 استفاده شود.

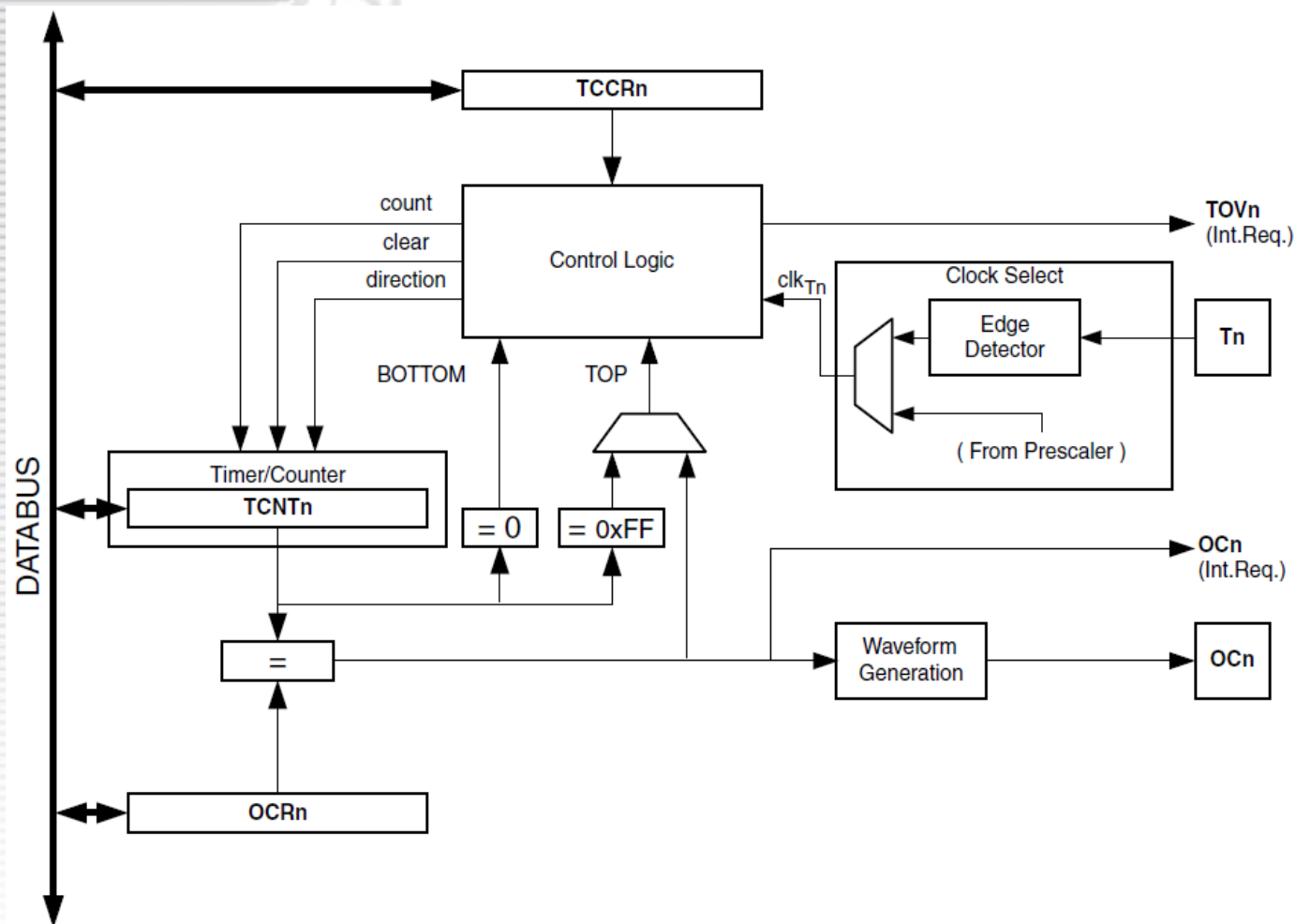
ثبات پرچم وقفه زمان سنج/شمارنده – TIFR

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0	TIFR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

بیت ۱-OCF0: پرچم Output Compare

- بیت OCF0 هنگامی که یک برابری مقایسه بین زمان سنج/شمارنده و داده موجود در ثبات Output Compare شماره ۰ رخ دهد، مقدار یک می گیرد.
- OCF0 هنگام اجرای بردار کنترل وقفه متناظر، توسط سخت افزار صفر می شود.
- به طریق دیگر OCF0 با نوشتن مقدار یک در پرچم در آن صفر می شود.
- هنگامیکه بیت وقفه سراسری I در ثبات SREG، بیت OCIE0 (فعال ساز وقفه برابری مقایسه زمان سنج/شمارنده ۰) و OCF0 مقدار یک می گیرد، وقفه برابری مقایسه زمان سنج/شمارنده ۰ اجرا می شود.

نمودار بلوکی زمان سنج / شمارنده ۸ بیتی



• بیت ۰ - TOV0: پرچم سرریز زمان سنج/شمارنده •

- بیت TOV0 هنگامی که یک سرریز روی زمان سنج/شمارنده ۰ رخ دهد، یک می شود. TOV0 هنگام اجرای بردار کنترل وقفه متناظر با آن، توسط سخت افزار صفر می شود.
- به طریق دیگر پرچم TOV0 با نوشتن مقدار یک در آن صفر می شود
- هنگامیکه بیت I در ثبات SREG، بیت TOIE0 (فعال ساز سرریز زمان سنج/شمارنده ۰) و TOV0 مقدار یک می گیرد، وقفه زمان سنج/شمارنده ۰ اجرا می شود.
- در حالت PWM با فاز صحیح، این بیت هنگامی که زمان سنج/شمارنده ۰ جهت شمارش خود را در \$00 تغییر دهد، یک می شود.

ثبات پوشش وقفه زمان سنج / شمارنده - TIMSK

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0	TIMSK
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

بیت ۱-OCIE0: فعال ساز خروجی برابری مقایسه زمان سنج / شمارنده •

• وقتی که بیت OCIE0 و بیت وقفه سراسری I در ثبات وضعیت با مقدار یک بازگذاری شوند، وقفه برابری مقایسه زمان سنج / شمارنده • فعال می شود.

• وقفه متناظر با آن در صورت رخداد یک برابری مقایسه در زمان سنج / شمارنده • رخ می دهد، یعنی وقتی که بیت OCF0 در ثبات پرچم وقفه زمان سنج / شمارنده TIFR یک باشد.

• بیت 0-TOIE: فعال ساز سرریز زمان سنج/شمارنده •

- وقتی که بیت **TOIE0** و بیت وقفه سراسری I در ثبات وضعیت یک شوند، وقفه سرریز زمان سنج/شمارنده • فعال می شود.
- وقفه متناظر با آن در صورت رخداد یک سرریز در زمان سنج/شمارنده • رخ می دهد، یعنی وقتی که بیت TOV0 در ثبات پرچم وقفه زمان سنج/شمارنده TIFR یک باشد.