



## مروری بر سایش توربین‌های آبی بر اثر ذرات معلق در آب

حامد امیری مقدم<sup>۱\*</sup>، پیمان تقی‌پور<sup>۲</sup>

۱- کارشناس مهندسی مکانیک، دفتر تحقیق و فناوری‌های نو، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، تهران  
 ۲- کارشناس ارشد مهندسی برق، دفتر انرژی و برق روستایی (فتوولتائیک)، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی ۱۴۶۸۶۱۱۳۸۷، amiri.m.hamed@gmail.com

### چکیده

با توجه به جایگاه نیروگاه‌های آبی در تولید انرژی الکتریکی و هزینه اولیه بالای ساخت و راه‌اندازی این نیروگاه‌ها، بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها در بیشترین راندمان در زمان عمر مفید آن از اهمیت زیادی برخوردار است. سایش در اثر رسوبات که بر اثر تأثیر حرکت ذرات معلق در آب بر روی یک سطح جامد اتفاق می‌افتد، یکی از دلایل کاهش راندمان و عمر مفید نیروگاه‌های آبی است. سایش در اثر ذرات معلق در توربین‌های آبی یک پدیده پیچیده است که تاکنون مدل ریاضی دقیق و جامعی برای توصیف آن توسعه نیافته است. به طور کلی سایش در توربین‌های آبی به خواص ذرات ساینده، خواص سطح و شرایط کارکرد توربین وابسته است. تحقیقات زیادی برای شناخت عوامل مؤثر بر سایش توربین‌ها در نیروگاه‌های آبی انجام شده است که اکثر آن‌ها متکی به نتایج آزمایشگاهی می‌باشند. در این تحقیق به مرور مطالعات انجام شده در زمینه تئوری سایش بر اثر ذرات، مدل‌های سایش در توربین‌های آبی و روش‌های جلوگیری از سایش در نیروگاه‌های آبی پرداخته شده است.

کلید واژگان: سایش، رسوبات، نیروگاه آبی، ذرات

## A review on sediment erosion in hydro turbines

Hamed Amiri Moghadam<sup>1\*</sup>, Peyman Taghipour<sup>2</sup>

1- New Energies Research and Technology Office, Renewable Energy Organization of Iran (SUNA), Tehran, Iran  
 2- Rural Electricity & Energy Office (Photovoltaic), Renewable Energy Organization of Iran (SUNA), Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 1468611387, Tehran, Iran, amiri.m.hamed@gmail.com  
 Received: 23 July 2015 Accepted: 21 September 2015

### Abstract

Hydropower plays an important role in electricity generation and due to high cost of developing a hydropower plant, running at maximum efficiency is essential during its lifetime. Sediment erosion which is caused by the dynamic action of silt flowing along with water, impacting against a solid surface is one reasons of declining performance and efficiency of hydro powers over time. Sediment erosion in hydro turbines is a complex phenomenon and there is no precise mathematical model for its description. Generally sediment erosion in hydro turbines depends on properties of particles, properties of base material and operating condition. There are a lot of studies that are aim to identify effective parameters of silt erosion in hydro turbines which most of them are based on experimental data. In this paper a review of studies on erosion theory, sediment erosion models and methods of sediment erosion prevention in hydro turbines has been discussed.

**Keywords:** Erosion, Sediment, Hydro Power plant, Particles



## ۱- مقدمه

استفاده از انرژی آب به عنوان یک منبع انرژی پاک، ارزان و قابل دسترس همواره مطرح بوده است. در حال حاضر نیز انرژی برقایی بخش مهمی از تولید برق در جهان را به خود اختصاص داده است. بر اساس آمار منتشر شده توسط شورای جهانی انرژی در سال ۲۰۱۳ [۱]، انرژی برقایی حدود ۱۶/۴٪ از کل برق تولید شده در جهان را تشکیل می‌دهد. بر اساس این گزارش سهم انرژی برقایی در تولید برق حاصل از منابع تجدیدپذیر ۷۶٪ می‌باشد. با توجه به جایگاه نیروگاه‌های آبی در تولید انرژی الکتریکی و هزینه اولیه بالای ساخت و راه‌اندازی این نیروگاه‌ها، بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها با عملکرد در بیشترین راندمان در زمان عمر مفید آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

سایش در اثر ذرات معلق در آب یکی از عوامل کاهش راندمان نیروگاه‌های آبی است. سایش در نیروگاه‌های جریان (ROR) که فاقد سدهای بزرگ می‌باشند، به علت غلظت بالای رسوبات رودخانه‌ها در زمان بارش باران از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. به عنوان مثال میزان غلظت ذرات در رودخانه‌ها در بدترین شرایط به ۵۷۰۰۰ ppm می‌رسد که بیش از ۸۰٪ آن از کوارتز با سختی ۷ در مقیاس موس تشکیل شده است [۲]. وجود ذرات معلق در آب باعث تغییرات پروفیل پره، تغییرات در الگوی جریان در توربین، ارتعاش، کم شدن راندمان توربین و در نهایت باعث از کار افتادن اجزای مختلف توربین می‌شود. به عنوان مثال سایش در اثر عبور رسوبات از توربین در یکی از نیروگاه‌های کشور نپال، باعث کم شدن ۸ درصدی راندمان در مدت کارکرد نزدیک به ۷۰ روز شده است [۲].

در این تحقیق به مرور مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در زمینه سایش در اثر رسوبات در توربین‌های آبی پرداخته شده است.

## ۲- تئوری سایش

### ۲-۱- مدل‌های سایش

به طور کلی پدیده سایش به صورت جدا شدن تدریجی ماده در اثر ضربه و تغییر شکل‌ها مداوم تعریف می‌شود. سایش در اثر ذرات معلق در نیروگاه‌های آبی یکی از دلایل کم شدن راندمان نیروگاه در طول زمان می‌باشد. سایش در اثر ذرات باعث تغییر در سطح و ایجاد بی‌نظمی‌هایی در سطوح در تماس با آب می‌شود که این بی‌نظمی‌ها خود به عنوان پایگاهی برای شکل‌گیری کاویتاسیون مطرح می‌شوند تاکنون به علت مشخص نبودن ساز و کار پدیده سایش به صورت کامل، مدل ریاضی دقیق و جامعی برای توصیف این پدیده توسعه نیافته است و اکثر مدل‌های سایش ارائه شده، مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. سایش در ماشین‌های آبی بر اساس نرخ سایش ( $W$ ) که به صورت کم شدن جرم ماده در واحد زمان تعریف می‌شود، کمی‌سازی شده است. به طور کلی نرخ سایش به صورت تابعی از خواص ذرات ساینده، خواص سطح و شرایط هیدرولیکی سیال بیان می‌شود.

آقای Truscott [۳] بر اساس بررسی نتایج ۲۰ ساله سایش و خوردگی در ماشین‌های آبی رابطه زیر را برای نرخ سایش بیان کرد.

$$W \propto V^n \quad (1)$$

در این رابطه  $W$  نرخ سایش،  $V$  سرعت ذرات و  $n$  یک ضریب تجربی بر اساس جنس ماده و سایر شرایط هیدرولیکی می‌باشد. در ادامه مدل‌های سایش ارائه شده در توربین‌های آبی آورده می‌شود.

### ۲-۲- مدل‌های سایش در توربین‌های آبی

آقای Tsuguo [۴] با بررسی داده‌های ۸ ساله مربوط به سایش در ۱۸ نیروگاه برقایی رابطه زیر را برای محاسبه نرخ سایش در توربین پیشنهاد کرد.

$$W = \beta C^{\alpha} a^{\gamma} k_1 k_2 k_3 V^m \quad [\text{mm}/\text{سال}] \quad (2)$$

در رابطه ( $W$ ) میزان کاهش ضخامت سطح بر حسب میلی‌متر در سال،  $\beta$  ضریب بخش سایش یافته توربین،  $C$  میزان غلظت ذرات معلق در آب،  $a$  ضریب اندازه ذرات،  $V$  سرعت نسبی ذرات و  $k_1$ ،  $k_2$  و  $k_3$  به ترتیب ضرایب شکل ذرات، سختی ذرات و مقاومت در برابر سایش بخش سایش یافته توربین می‌باشند. ثابت  $m$  در این رابطه بیانگر شدت تأثیر سرعت نسبی ذرات بر میزان خوردگی می‌باشد که برای توربین‌های مختلف متفاوت است. طبق رابطه پیشنهاد شده توسط آقای Tsuguo کمترین میزان تأثیر سرعت بر سایش در بشقابک‌های توربین پلتنون  $m = 1.5$  و بیشترین میزان تأثیر در رانر توربین فرانسسیس با  $m = 3$  می‌باشد. برای نازل توربین پلتنون و پره‌های راهنمای توربین فرانسسیس  $m = 2.5$  پیشنهاد شده است. همچنین ثوابت  $x$  و  $y$  در توربین‌های مختلف نزدیک به یک می‌باشد.

آقای Thapa [۵] با انجام تست‌های آزمایشگاهی در شرایط مختلف رابطه تجربی زیر را برای نرخ سایش در توربین‌های آبی ساخته شده از 16Cr-5Ni ارائه داد.

$$y = 6^{-5} x^{3.13} \quad [\text{mg}/\text{kg}] \quad (3)$$

در رابطه ( $y$ ) میزان کاهش جرم توربین در واحد جرم ذرات معلق در آب و  $x$  سرعت برخورد ذرات با زاویه برخورد ۴۵ درجه می‌باشد.

رابطه زیر را برای میزان سایش در یک توربین آبی توسط آقای Asthana [۶] ارائه شده است.

$$TA = f(PE, v^z) \quad (4)$$

در رابطه ( $f$ )  $PE$  ضریب اصلاح شده رسوبات،  $v$  سرعت نسبی ذرات و  $z$  ضریب اصلاح سرعت می‌باشد. ضریب اصلاح شده رسوبات توسط معادله زیر بیان می‌شود.

$$PE = P^{\alpha} a^{\beta} k_1 k_2 k_3 \quad (5)$$

در این معادله،  $P$  غلظت متوسط سالانه رسوبات رودخانه بر حسب  $\text{gm}/\text{l}$ ،  $a$  متوسط اندازه ذرات و ثوابت  $k_1$ ،  $k_2$  و  $k_3$  به ترتیب ضرایب شکل ذرات، سختی ذرات و مقاومت در برابر سایش سطح توربین می‌باشد. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  نیز برای تصحیح اثرات غلظت و اندازه ذرات به کار می‌روند. برای غلظت متوسط سالانه کمتر از  $5 \text{ g}/\text{l}$ ،  $\alpha = 1$  و برای اندازه ذرات کوچک‌تر از  $1 \text{ mm}$   $\beta = 1/6$  در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای ضریب  $k_1$  بسته به میزان بی‌نظمی‌های شکل ذرات مقادیر  $0.1$ ،  $0.25$  و  $1$  به ترتیب برای بی‌نظمی‌های کم تا شدید در نظر گرفته می‌شود. ضریب  $k_2$  نیز برای سختی ۳ و بالاتر (بر اساس مقیاس موس) برابر  $1$  و برای سختی کمتر از ۳،  $k_2 = 0.5$  و  $k_3 = 1$  در نظر گرفته می‌شود. برای فولاد 13Cr4Ni نیز  $k_3 = 1$  می‌باشد.

### ۳- سایش در توربین‌های آبی

توربین‌های آبی به طور کلی بر اساس مکانیسم تبادل انرژی با سیال به دو بخش توربین‌های ضربه‌ای و عکس‌العملی تقسیم می‌شوند. بر این اساس توربین‌های پلتنون و تارگو مثالی از توربین‌های ضربه‌ای و توربین‌های فرانسسیس، کاپلان و بالب نمونه‌هایی از توربین‌های عکس‌العملی می‌باشند.

توربین پلتون مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این مطالعه رابطه تجربی زیر برای نرخ سایش در توربین پلتون ارائه شده است.

$$W = 4.02 \times 10^{-12} \cdot S^{0.0567} \cdot C^{1.2267} \cdot V^{3.79} \quad (8)$$

در رابطه (8)  $W$  نرخ سایش بر حسب  $(\frac{g}{m^3 s})$ ،  $S$  قطر ذرات بر حسب متر،  $C$  غلظت ذرات بر حسب ppm،  $V$  سرعت ذرات بر حسب m/s و  $t$  زمان کارکرد توربین بر حسب ساعت می باشد.

آقای Padhy نیز در یک مطالعه دیگر [۱۲] با انجام تست‌های آزمایشگاهی اثر سایش ذرات را بر عملکرد توربین پلتون مورد بررسی قرار داد. بر اساس این مطالعه، رابطه تجربی زیر برای کاهش راندمان توربین پلتون ارائه شده است [۱۲].

$$\eta\% = 2.43 \cdot 10^{-10} \cdot t^{0.75} \cdot S_p^{0.099} \cdot C^{0.93} \cdot V^{3.40} \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $\eta$  درصد کاهش راندمان به ازای  $t$  ساعت کارکرد،  $S_p$  قطر ذرات به میکرومتر،  $C$  غلظت ذرات و  $V$  سرعت ذرات می باشد.

### ۳-۲- توربین فرانسسیس

بر اساس یک مطالعه صورت گرفته در کشور ژاپن، آقای Sato و Okamura [۱۳] با انجام تست‌های آزمایشگاهی روی یک نمونه کوچک شده توربین فرانسسیس اثر سایش ذرات را بر بیشترین راندمان توربین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین راندمان توربین با افزایش غلظت ذرات معلق در آب کاهش می‌یابد. رابطه زیر برای تخمین راندمان توربین فرانسسیس در اثر سایش ذرات ارائه شده است [۱۳].

$$\eta_m = (1 - 0.085C_w)\eta_w \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)  $\eta_m$  بیشترین راندمان توربین در اثر وجود ذرات با غلظت  $C_w$  و  $\eta_w$  بیشترین راندمان توربین در آب بدون ذرات می باشد.

آقای Thapa و همکاران نیز با بررسی نتایج آزمایشگاهی و بررسی مدل‌های سایش موجود در توربین فرانسسیس، روابط تجربی زیر را برای تخمین نرخ سایش و کاهش راندمان توربین ارائه کرده است.

$$E_r = C \cdot K_h \cdot K_s \cdot K_m \cdot K_f \cdot a \cdot d_p^b \quad [mm/سال] \quad (11)$$

$$\eta_r = c(E_r)^d \quad [سال/\%] \quad (12)$$

در رابطه‌های (۱۱)  $E_r$  میزان کاهش ضخامت توربین در هر سال،  $C$  غلظت ذرات بر حسب  $kg/m^3$  و  $d_p$  قطر میانه ذرات بر حسب میلی‌متر می باشد. ضرایب  $K_h$ ،  $K_s$ ،  $K_m$ ،  $K_f$  نیز به ترتیب بیانگر سختی ذرات، شکل ذرات، مقاومت در برابر سایش بدنه توربین و ضریب بخش سایش یافته توربین می باشد. ثوابت تجربی  $a$  و  $b$  نیز مانند توربین پلتون بر حسب میزان کوارتز موجود در ذرات از جدول (۱) به دست می آیند.

در رابطه (۱۲)  $\eta_r$  کاهش راندمان سالانه و ثوابت تجربی  $c = 0.1522$   $d = 1.6946$  می باشد. رابطه (۱۲) میزان کاهش راندمان توربین فرانسسیس مرکز هیدروالکتریک Jhimruk در کشور نپال را ۱٪ در سال پیش‌بینی می کند که با اندازه‌گیری‌های انجام شده مطابقت دارد.

### ۴- روش‌های جلوگیری از سایش در توربین‌های آبی

با توجه به اثرات مخرب سایش ذرات در توربین‌های آبی روش‌های مختلفی برای جلوگیری و یا کم کردن اثر سایش ذرات بر عملکرد نیروگاه‌های آبی به وجود آمده است. به طور کلی این روش‌ها به سه دسته الف) جلوگیری از

همان طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، در سایش توربین‌های آبی در اثر ذرات معلق در آب پارامترهای زیادی نقش دارند. سرعت نسبی، اندازه، شکل، غلظت و درجه سختی ذرات، میزان مقاومت سطح توربین در برابر سایش از جمله پارامترهای مهم در سایش توربین‌های آبی می باشند. به علت پارامترهای متعدد مؤثر در پدیده سایش و پیچیدگی آن، تاکنون مدل ریاضی دقیق و جامعی برای توصیف سایش در توربین‌های آبی توسعه نیافته است. همچنین الگوهای سایش در توربین‌های آبی به علت تغییرات در غلظت و جنس و اندازه رسوبات معلق در آب و تغییرات در شرایط کارکرد توربین پیچیده‌تر می باشد.

به طور کلی تشخیص نوع دقیق سایش در توربین‌های آبی امکان پذیر نمی باشد. آقای Brekke [۷] بر اساس بررسی سایش در چندین نیروگاه آبی الگوهای سایش را در توربین‌های آبی به سه قسمت تقسیم کرده است. الف) سایش در مقیاس میکرو در اثر ذرات کوچک ( $d_p < 60\mu m$ ) با سرعت‌های بالا ب) سایش در اثر جریان‌های ثانویه‌ای و گردابه‌ای ج) سایش به علت شتاب زیاد ذرات بزرگ ( $d_p > 0.5 mm$ )

بر اساس شبیه‌سازی عددی انجام شده توسط آقای Neopane [۸] سایش در توربین فرانسسیس در پره‌های راهنما، ورودی رانر و پره‌های توربین از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین در توربین پلتون، احتمال سایش در نازل، سوزنی و بشقابک‌های توربین بیشتر از سایر قسمت‌ها می باشد.

آقای Neopane در یک مطالعه دیگر [۹] اثر اندازه و شکل ذرات معلق در آب را در سایش توربین‌های آبی بررسی کرد. وی اثر ذرات با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف (۱۰-۱ mm) را در شرایط کارکرد یکسان مورد آزمایش قرار داد. نتایج حاصل از این آزمایش بیانگر این بود که ذرات مثلثی شکل عامل سایش در سمت کم فشار پره‌های راهنما می باشد.

### ۳-۱- توربین پلتون

آقای Bajracharya و همکاران [۱۰] رابطه تجربی زیر برای نرخ سایش و کاهش راندمان هیدرولیکی توربین پلتون ارائه داده است.

$$E_r \propto a \cdot d_p^b \quad [mm/سال] \quad (6)$$

در رابطه بالا  $E_r$  نرخ کاهش ضخامت و  $d_p$  سایز ذرات می باشد. ضرایب ثابت  $a$  و  $b$  که به جنس ذرات معلق در آب بستگی دارند، از جدول (۱) به دست می آیند.

جدول ۱: ثوابت  $a$  و  $b$  در رابطه ۴ برحسب درصد کوارتز در ذرات معلق در آب

ردیف	درصد کوارتز در ذرات	a	b
۱	٪۳۸	۳۵۱/۳۵	۱/۴۹۷۶
۲	٪۶۰	۱۱۹۹/۸	۱/۸۰۲۵
۳	٪۸۰	۱۴۸۲/۱	۱/۸۱۲۵

همچنین رابطه زیر برای کاهش راندمان در توربین پلتون و نرخ سایش پیشنهاد شده است.

$$\eta_r \propto a \cdot E_r^b \quad (7)$$

در رابطه (۵)  $\eta_r$  میزان کاهش راندمان در هر سال بر اثر سایش ذرات،  $a = 0.1522$  و  $b = 1.6946$  می باشد.

آقای Saini و Padhy [۱۱] با انجام تست‌های آزمایشگاهی روی یک نمونه کوچک شده توربین پلتون، اثر اندازه و غلظت ذرات را بر میزان سایش

## ۶- منابع

- [1] *World Energy Resources; Charting the Upsurge in Hydropower Development*, World Energy Council 2015.
- [2] D. O. Pradhan PMS, Joshi PN, Stole H, *Sediment and efficiency measurements at Jhimruk hydropower plant—monsoon 2003*, HydroLab, Nepal, 2004.
- [3] G. Truscott, A literature survey on abrasive wear in hydraulic machinery, *Wear*, vol. 20, pp. 29-50, 1972.
- [4] N. Tsuguo, Estimation of repair cycle of turbine due to abrasion caused by suspended sand and determination of desilting basin capacity, in *Proceedings of international seminar on sediment handling technique*, NHA, Kathmandu, 1999.
- [5] B. Thapa, *Sand erosion in hydraulic machinery*, 2004.
- [6] B. A. G. Chauhan and D. Verma, Determination of optimal sediment size to be excluded for run-of-river projects—a case study, *Silting Problems in Hydropower Plants*, p. 206, 2002.
- [7] H. Brekke, W. Wu, and B. Cai, Design of hydraulic machinery working in sand laden water, *Abrasive erosion & corrosion of hydraulic machinery*, pp. 156-171, 2002.
- [8] H. P. Neopane, *Sediment erosion in hydro turbines*, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [9] H. P. Neopane, O. G. Dahlhaug, and B. Thapa, An investigation of the effect of particle shape and size in hydraulic turbines, in *Waterpower XVI 09*, 2009.
- [10] T. Bajracharya, B. Acharya, C. Joshi, R. Saini, and O. Dahlhaug, Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: a case study of Chilime hydropower plant, *Wear*, vol. 264, pp. 177-184, 2008.
- [11] M. Padhy and R. Saini, Effect of size and concentration of silt particles on erosion of Pelton turbine buckets, *Energy*, vol. 34, pp. 1477-1483, 2009.
- [12] M. Padhy and R. Saini, Study of silt erosion on performance of a Pelton turbine, *Energy*, vol. 36, pp. 141-147, 2011.
- [13] T. Takagi, T. Okamura, and J. Sato, Hydraulic performance of a Francis-turbine for sediment-laden flow, *Hitachi review*, vol. 37, pp. 115-120, 1988.
- [14] B. Thapa, P. Upadhyay, O. G. Dahlhaug, M. Timsina, and R. Basnet, HVOF coatings for erosion resistance of hydraulic turbines: Experience of Kaligandaki-A Hydropower Plant, *Water resources and renewable energy development in Asia*, Danang, Vietnam, 2008.
- [15] M. Bishwakarma and H. Støle, Real-time sediment monitoring in hydropower plants, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 46, pp. 282-288, 2008.

ورود ذرات به توربین، ب) استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر سایش در ساخت قطعات مختلف توربین و ج) کنترل کردن میزان غلظت ذرات تقسیم می‌شوند. در ادامه هر یک از این روش‌ها به صورت اجمالی بررسی می‌شوند.

### ۴-۱- جلوگیری از ورود ذرات به توربین

سدها در نیروگاه‌های آبی برای اهداف مختلف مانند ذخیره آب، کنترل سیل و ... ساخته می‌شوند. یکی دیگر از اهداف ساختن سد، کم کردن سرعت آب و در نتیجه ته‌نشین شدن رسوبات می‌باشد. آب بعد از عبور از سد، از یک محفظه دیگر برای کمتر شدن سرعت و در نتیجه رسوب ذرات کوچک‌تر می‌گذرد تا با غلظت مشخصی از ذرات وارد نیروگاه شود.

### ۴-۲- استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر سایش

یکی از روش‌های مؤثر در کم شدن اثر سایش ذرات در عملکرد توربین‌های آبی استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر سایش می‌باشد. به طور کلی در ساخت توربین‌های آبی از پوشش‌های سرامیکی و آلیاژهای مقاوم در برابر سایش استفاده می‌شود. به عنوان نمونه استفاده از پوشش سرامیکی مقاوم در برابر سایش در برخی قسمت‌های توربین فرانسویس نیروگاه Kaligandaki در کشور نپال نشان می‌دهد که بعد از گذشت سه سال، قسمت‌های پوشش‌دار توربین آسیب جدی در برابر سایش ذرات نداشته‌اند. این در حالی است که قسمت‌های بدون پوشش بعد از سه سال کاملاً در اثر ذرات سایش یافته‌اند [۱۴].

### ۴-۳- کنترل غلظت ذرات

یکی دیگر از روش‌های جلوگیری از آسیب دیدن توربین و بخش‌های مختلف نیروگاه، کنترل کردن پیوسته غلظت ذرات معلق در آب می‌باشد. این روش می‌تواند در نیروگاه‌های جریان‌ی که فاقد سد یا مخزن ذخیره کننده بزرگ آب می‌باشند مؤثر باشد. در این روش غلظت ذرات معلق در آب با استفاده از حس‌گرهای به صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌شود و در صورت تجاوز غلظت ذرات از میزان استاندارد، نیروگاه از مدار خارج می‌شود [۱۵].

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سایش در اثر ذرات معلق در آب در توربین‌های آبی یکی از پدیده‌های پیچیده است که تاکنون مدل ریاضی دقیق و جامعی برای توصیف آن توسعه نیافته است. به طور کلی سایش در توربین‌های آبی به خواص ذرات ساینده، خواص سطح و شرایط هیدرولیکی سیال وابسته است. تحقیقات زیادی برای شناخت عوامل مؤثر بر سایش توربین‌ها در نیروگاه‌های آبی انجام شده است که اکثر مدل‌های سایش ارائه شده مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی می‌باشند. همچنین به دلیل عملی نبودن حذف کامل رسوبات از آب ورودی به نیروگاه‌ها، تاکنون روش‌های مختلفی مانند استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر سایش و کنترل غلظت ذرات برای جلوگیری و کم کردن اثر سایش ذرات بر عملکرد توربین‌ها به وجود آمده است.